

THESIS / THÈSE

MASTER EN SCIENCES INFORMATIQUES

Réalité augmentée pour la maintenance domestique

Beaupère, André

Award date:
2019

Awarding institution:
Université de Namur

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

UNIVERSITÉ DE NAMUR
Faculté d'informatique
Année académique 2018–2019

Réalité augmentée pour la maintenance domestique

André Beaupère



Promoteur : Bruno Dumas (Signature pour approbation du dépôt - REE art. 40)

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de
Master en Sciences informatiques.

1. Table des matières

1.	<i>Table des matières.....</i>	2
2.	<i>Résumé.....</i>	4
3.	<i>Remerciements</i>	5
4.	<i>Introduction</i>	6
5.	<i>Choix du protocole</i>	10
6.	<i>Définir la question de recherche</i>	11
7.	<i>Ressources employées dans cette recherche</i>	12
8.	<i>Méthode de sélection des articles.....</i>	14
9.	<i>Évaluer la qualité des articles trouvés.....</i>	15
10.	<i>Résumé des articles collectés et sélectionnés</i>	18
10.1.	<i>Définition de la maintenance en réalité augmentée</i>	18
	10.1.1. Concepts de la réalité augmentée	18
	10.1.2. Senseurs et "Vuforia".....	22
	10.1.3. Fast tracking grâce aux senseurs	23
	10.1.4. Formalisation de la tâche d'Authoring.....	24
	10.1.5. Occlusion et Parallaxe	25
	10.1.6. Utilisation de la CAO pour le Mapping	26
	10.1.7. Définition des marqueurs (markers) et de l'occlusion	29
	10.1.8. Que retenir ?.....	32
10.2.	<i>Interface Homme Machine</i>	33
	10.2.1. Réparer un vélo grâce à une application de réalité augmentée... 33	
	10.2.2. Modélisation des tâches de maintenance (Vats)	34
	10.2.3. Taux d'erreur et ergonomie d'une application de RA.....	35
	10.2.4. Navigation AR : vue Fish-eyes'	36
	10.2.5. Navigation AR : flèche 2D et 3D	38
	10.2.6. Caractérisation de l'Authoring.....	39
	10.2.7. Test d'une application de réalité augmentée pour la maintenance d'un PC.....	40
	10.2.8. Éléments d'interface entre l'utilisateur et l'application.....	41
	10.2.9. Contrôle d'application par la voix	43
	10.2.10. Conception d'une IHM pour la AR	44
	10.2.11. Adaptation d'une application de AR à son utilisateur.....	48
	10.2.12. Que retenir?.....	50
10.3.	<i>Algorithmes.....</i>	51
	10.3.1. Formalisation des phases AR: Authoring – Mapping – Tracking .51	
	10.3.2. Introduction à SLAM et aux phases de Mapping et Tracking.....	52
	10.3.3. Que retenir.....	52
10.4.	<i>Perspectives</i>	53
	10.4.1. Panorama de la réalité augmentée dans les entreprises.....	53
	10.4.2. Que retenir?.....	54

11.	<i>Synthèse des données collectées.....</i>	55
11.1.	Phases de la réalité augmentée	55
	11.1.1. Authoring	55
	11.1.2. Mapping.....	56
	11.1.3. Tracking.....	58
11.2.	Aspects liés aux questions D'IHM	58
11.3.	Algorithme d'aide pour la réalité augmentée	59
11.4.	Évaluation des logiciels nécessaires pour établir une application de réalité augmentée	60
11.5.	Quels sont les dispositifs matériels pouvant aider les applications de réalité augmentée	64
11.6.	Perspectives d'évolution de la réalité augmentée domestique.....	65
12.	<i>Discussion sur la réalisation d'une application de réalité augmentée appliquée à la maintenance domestique</i>	66
13.	<i>Conclusion</i>	69
14.	<i>Glossaire</i>	70
15.	<i>Bibliographie.....</i>	73
16.	<i>Table des Illustrations</i>	78
17.	<i>Annexes.....</i>	80
17.1.	Disponibilité ARCore.....	80
17.2.	Exemple d'application de réalité augmentée	81

2. Résumé

Depuis de nombreuses années, l'utilisation de la réalité augmentée dans les tâches de maintenance industrielle a prouvé son efficacité par rapport au système 2D (écran, papier).

Dans un premier temps, ce travail a pour but d'évaluer le potentiel de telles applications dans le cadre de la maintenance au foyer.

Sachant que l'environnement industriel est très différent de l'environnement domestique, ne serait-ce que par la capacité de mise en œuvre de moyens techniques importants, il s'agira ensuite de trouver les techniques et les progiciels nécessaires à la réalisation d'applications de maintenance domestique. Ce travail est un état de l'art utilisant une Revue Systématique Littéraire (RSL) comme méthodologie. Elle a permis de découvrir 6 axes d'intérêt: les solutions logicielles, les algorithmes, les phases de la réalité augmentée [Authoring, Mapping, Tracking], l'analyse de l'interface humaine, les possibilités matérielles et enfin les perspectives de telles applications.

Enfin, sur base de ces recherches nous en retirerons des recommandations pour réaliser une application de réalité augmentée pour la maintenance domestique.

For many years, the use of augmented reality in industrial maintenance tasks has proven its effectiveness compared to the 2D system (screen, paper).

At first, this work aims to evaluate the potential of such applications in the context of home maintenance.

Knowing that the industrial environment is very different from the domestic environment, already by the capacity of the implementation of important technical engineering, it will be a matter of finding the techniques and the software packages necessary for the realisation of home maintenance applications. This work is a state of art using a literary systematic review (SLR) as methodology. It allows discovering 6 axes of interest: the software solution, the algorithms, the phases of the augmented reality [Authoring, Mapping, Tracking], the analysis of man/machine interface, the hardware possibilities and finally the perspectives of such applications.

Finally, based on this research we will open recommendations for an augmented reality application for home maintenance.

3. Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon promoteur le professeur Bruno Dumas, de l'université de Namur, pour la disponibilité et la patience qu'il m'a témoignées.

Pour le point initial de ce mémoire (la réalité augmentée) je tiens à remercier Olivier Carlens de la société "John Cockerill" pour son accueil et sa gentillesse.

Je remercie ma famille, mes amis et mes collègues étudiants pour leurs conseils et leur soutien durant cette dernière étape de mon parcours universitaire tardif. Et particulièrement Jean-Michel Cafagna et Julien Albert pour leur aide et leur confiance dans ma réussite.

Je remercie tout particulièrement Xavier Hutsemékers pour sa relecture attentive et son aide.

Et enfin je remercie l'hospitalité du Frère Ignace et l'hôtellerie de l'abbaye de Maredsous, où le calme et le wifi m'ont permis d'avancer de manière conséquente dans l'écriture de ce mémoire.

4. Introduction

C'est dans l'air du temps d'organiser des "Repair café" et de puiser sur YouTube des tutoriaux aussi variés que: "le démontage d'un volet manuel", "comment changer le thermostatique d'une colonne de douche", ou encore "comment remonter la porte d'un four"... mais cela reste dans la 2D, et les aller-retour entre la vidéo et la réalité accroît l'écart cognitif et donc augmente la charge cognitive totale [1].

La réalité augmentée est définie comme une augmentation du monde réel grâce à des objets virtuels. Elle doit aussi être interactive et aligner l'objet virtuel sur le monde réel, mais surtout s'adapter aux mouvements de l'utilisateur pour lui faire croire que l'image générée a une réalité crédible dans l'espace à trois dimensions.

La réalité augmentée (RA/AR Augmented Reality) ou réalité mixte (RM/MR Mixed Reality) est donc un système qui superpose des images de synthèse interactives et adaptatives aux images réelles (par exemple la vision tête haute dans une voiture où les informations de l'ordinateur de bord apparaissent sur le pare-brise, mélangées à la vision réelle du conducteur).

La virtualité augmentée (Augmented Virtuality) est une scène virtuelle où l'on ajoute des éléments du réel (par exemple un jeu de bataille spatiale en image de synthèse ou l'on peut voir sa main interagir avec cet environnement).

Il n'y a pas de frontière fixe entre ces deux concepts, tout dépend de la proportion réel/virtuel, il s'agit donc d'un espace, un "continuum" dans lequel s'inscrivent les applications développées, comme l'illustre le schéma ci-dessous créé par Milgram et Kishino en 1994.

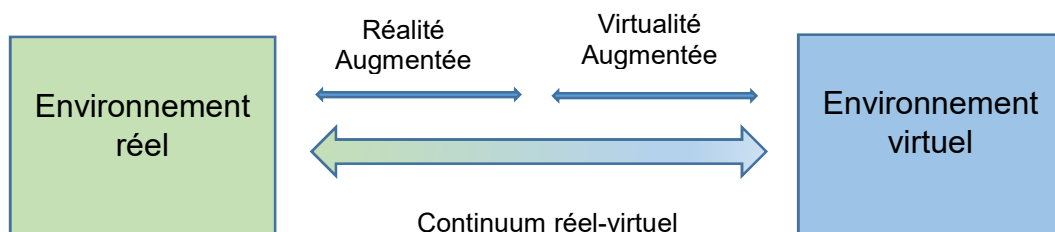


Figure 1 Tirée de « A taxonomy of mixed reality visual displays » [42]

Il existe de nombreuses applications actuelles qui permettent l'utilisation de ces techniques, par exemple celles illustrées ci-après:

- Visualiser un meuble virtuel dans un emplacement potentiel, comme le fait l'application "Ikea Place"¹ (Figure 2);
- Donner vie aux constructions réelles réalisées en "Lego" avec l'application "Lego Nexo Knight"² qui permet aux enfants d'y faire évoluer leur chevalier (Figure 3);

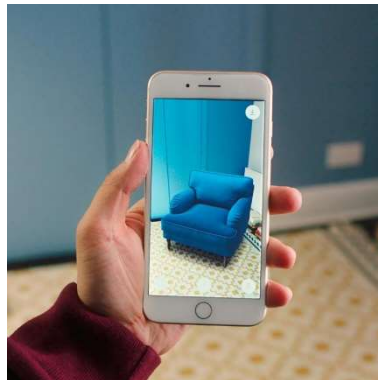


Figure 2 Ikea Place [2]



Figure 3 Lego Nexo Knight [3]

- Une autre application nécessitant un matériel adapté peut aussi être considérée comme de la réalité augmentée : "Accuvein"³ - qui permet à l'infirmière de visualiser les veines avant la piqûre (Figure 4).



Figure 4 Visualisation des veines ¹



1 https://play.google.com/store/apps/details?id=com.inter_ikea.place&gl=BE

2 <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.lego.nexoknights.merlok&gl=BE>

3 <https://www.accuvein.com/>

Comme une image est plus parlante que des mots, dans l'annexe 17.2 vous pourrez tester une application de réalité augmentée au moyen de votre téléphone, ou de votre tablette, en ayant au préalable installé l'application "HBR augmented reality", qui peut être téléchargée sur ces pages :

Pour IOS : <https://apps.apple.com/fr/app/hbr-augmented-reality/id1290907245>



Pour Android <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.ptc.hbrar&hl=fr>



Mais ces idées pourraient amener à généraliser le développement de tutoriaux 3D dans un usage domestique quotidien pour, par exemple:

- contenir le manuel assez technique d'une machine à café et permettre une interaction directe et "guidée" de l'utilisateur sur la machine, le remplacement d'un filtre, pour une réparation ou encore un détartrage;
- configurer ou désactiver le capteur d'une alarme d'intrusion au moyen d'un "boîtier de commande virtuel" se superposant directement aux détecteurs de mouvement;
- fournir une aide à l'utilisation des extincteurs ou encore des défibrillateurs cardiaques dont le fonctionnement peut paraître complexe.

Afin de généraliser au maximum cette vision, on utilisera le smartphone ou la tablette, présente dans la plupart des foyers, ils possèdent une seule caméra et des senseurs de position qui permettent de piloter une réalité augmentée, comme l'ont démontré le jeu "Pokémon Go"⁴, l'application "Ikea Place" citée ci-dessus ou encore l'application "Pictofit"⁵, cabine d'essayage virtuelle.

Néanmoins, dans le cadre d'autres applications, il pourrait être utile de développer, pour un usage domestique, des lunettes qui laissent les mains libres (pour la machine à café) ou permettent d'avoir une vision globale (voir une pièce vide et la meubler), ou un système de projection permettant de centrer avec précision des étagères après les avoir vues, virtuellement placées.

Toutefois, dans ce mémoire, nous allons nous focaliser plus particulièrement sur l'état des lieux de ce qui a été fait, en réalité augmentée, pour la maintenance domestique via smartphone ou tablette, prospecter sur les possibilités qu'elle offre et voir quelles sont les techniques à adopter et les contraintes à respecter. Nous n'envisagerons pas la programmation d'une telle application, mais bien les



4 <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.nianticlabs.pokemongo&gl=BE>

5 <https://www.reactivereality.com/pictofit.html>

concepts qui permettraient de la créer, car nous constaterons que ce type d'application n'existe pas encore.

C'est pourquoi la maintenance industrielle sera aussi évoquée pour nourrir la réflexion sur les aspects liés à la maintenance, en tenant compte du fait qu'au niveau domestique, les contraintes environnementales et les moyens mis en œuvre diffèrent beaucoup. De plus, au fur et à mesure de la lecture des articles trouvés, de nouvelles questions de vocabulaire ou de détails sont apparues, et même si ces informations ne sont pas stricto sensu dans le résumé des articles, elles nourriront la synthèse.

Note de l'auteur : ma profession d'enseignant m'a naturellement amené à soigner l'accessibilité à tout un chacun en adoptant un ton plus didactique.

5. Choix du protocole

Pour évaluer un état de l'art de la réalité augmentée domestique, une méthode SLR (Systematic Literature Review) qui, documentée par Booth [4] dans son "Approche systématique pour une revue littéraire réussie" [traduction], ainsi que des éléments du cours d'"Initiation à la démarche scientifique", donné par P. Y. Schobbens donne la structure suivante à ce document :

1. Définir le protocole;
2. Définir les questions de recherche;
3. Chercher la littérature;
4. Sélectionner;
5. Extraire les informations;
6. Évaluer la qualité (validation);
7. Synthétiser;
8. Répondre à la question.

L'organisation de ce mémoire suit cette structure, mais les points essentiels en sont l'extraction des informations (chapitre 10: Résumé des articles collectés et sélectionnés) et leur synthèse (chapitre 11: Synthèse des données collectées) organisée suivant les informations fournies par l'évaluation de la qualité (chapitre 9: Évaluer la qualité des articles trouvés).

6. Définir la question de recherche

La question qui est le centre d'une démarche SLR découle directement de l'introduction :

Q : Quels sont les concepts à utiliser pour développer une application de réalité augmentée dans des opérations de maintenance domestique ?

Nous garderons à l'esprit l'exemple suivant, auquel j'ai été confronté plusieurs fois, le détartrage en 15 étapes de cette machine à café. Procédure que j'ai dû parfois répéter deux fois de suite, ayant raté une étape.

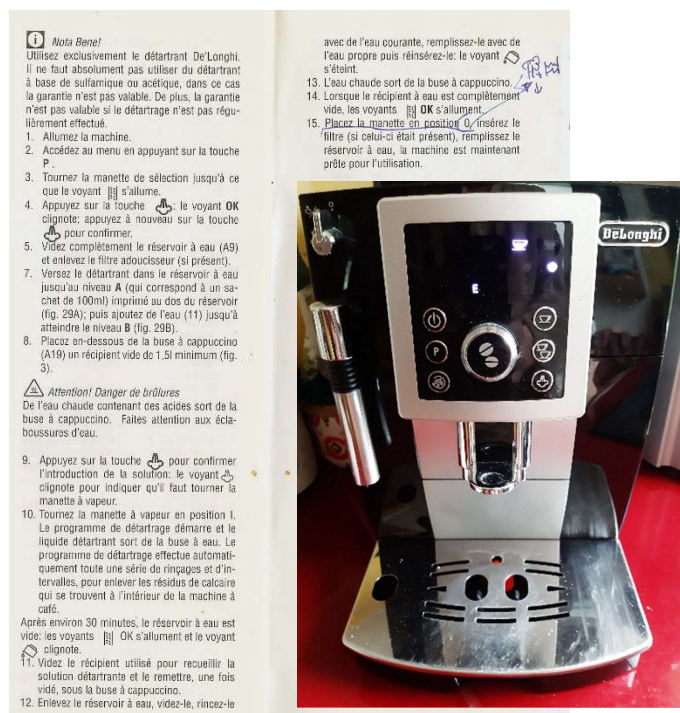


Figure 5 Exemple d'une machine à café et sa procédure de détartrage.

En anglais, la recherche s'est effectuée dans un premier temps avec les termes suivants: "augmented reality domestic repair" (sur "Google Scholar"), mais pour élargir les champs de recherche, il a été aussi utilisé "augmented reality maintenance" incluant la maintenance industrielle, car les sources concernant les applications domestiques sont encore trop rares.

Un article phare ("A systematic review of augmented reality applications in maintenance" [1]) a permis de rebondir sur d'autres références. Et "Mixed Reality" a été aussi utilisé, car il est un synonyme d'"Augmented Reality". D'autres termes ont été cherchés suivant les références trouvées dans les articles comme "6D pose"⁶ ou encore "SLAM"⁷. Tous les acronymes sont définis sur le signet joint à cet ouvrage ou dans le chapitre 14 Glossaire.

⁶ : Position d'un objet identifié dans l'environnement RA (3D) et un vecteur d'orientation et d'échelle (3D).

⁷ Simultaneous Localization and Mapping

7. Ressources employées dans cette recherche

Un travail de ce type ne peut plus se faire sans internet, que ce soit pour la recherche ou pour l'obtention des articles scientifiques. La recherche est assez simple tandis qu'obtenir l'article relève du jeu de piste. En effet il est à déplorer que de nombreux articles scientifiques soient payants, trouver des versions gratuites est plus ardu.

Les sources de recherche employées sont :

- "Google Scholar" (scholar.google.com)

Une des principales portes d'entrée vers la littérature scientifique, avec la puissance et la souplesse de Google. Il permet de voir le nombre de citations d'un article dans le résultat de la recherche, ce qui permet plus rapidement d'en évaluer la pertinence. Le classement chronologique a apporté aussi ses avantages.

- "Elsevier" (<https://www.elsevier.com>)

Une recherche moins puissante que "Google Scholar", mais le site s'attache plus à la qualité qu'au nombre, et fournit le texte complet. C'est un éditeur de littérature scientifique qui supporte plusieurs plateformes de diffusion :

- "ScienceDirect" (www.sciencedirect.com)
- "Scopus" (<https://www.scopus.com>)

Sur Scopus aucun article postérieur à 2011 n'a été trouvé, mais il permet de s'authentifier avec son compte Unamur.

Deux grandes associations techniques :

- "ACM Digital Library" (<http://portal.acm.org>)
Ils permettent de télécharger certains articles obtenus par les autres recherches.
- "IEEE⁸ Digital Library" (<https://www.computer.org/csdl/>)
Librairie de centaines d'articles, mais le plus souvent payante.

Une autre source trouvée grâce à Google et qui a fourni de nombreux articles gratuits :

- "ScholarSpace", Université d'Hawaï
(<https://scholarspace.manoa.hawaii.edu>)
Des articles (7) ont pu être téléchargés depuis cette université.

Il ne faut pas oublier Google, qui, pour des recherches générales, du vocabulaire ou des points de détails, rend de grands services.

⁸ Institute of Electrical and Electronics Engineers

L'utilisation d'un programme de gestion de bibliographie "Mendeley"⁹ a apporté un grand confort dans la lecture des "PDF" (un lecteur est intégré au software liant la référence au fichier) et a une bonne intégration (plugin) au niveau de Word pour la gestion bibliographique tandis qu'un plugin pour Chrome permet de référencer facilement une page web.

⁹  www.mendeley.com

8. Méthode de sélection des articles

Seules les publications ayant une source universitaire ont été sélectionnées.

Pour chaque article, la validité d'un abstract par rapport à leur contenu a été vérifiée.

Pour chaque article, des "Post-It" ont été écrits, reprenant par mots clefs les différents thèmes abordés dans l'article, en s'inspirant du "Work Activity Affinity Diagram" (WAAD), vu au cours d'"Interface humaine et machines" de B. Dumas ainsi que le chapitre "tris des cartes" du livre " Méthode de design UX " de C. Gronier [5].

Chaque "Post-It" comporte un mot clef de l'article et une référence numérique à cet article. Ensuite, il faut identifier les catégories en classant les "Post-It" par affinité.

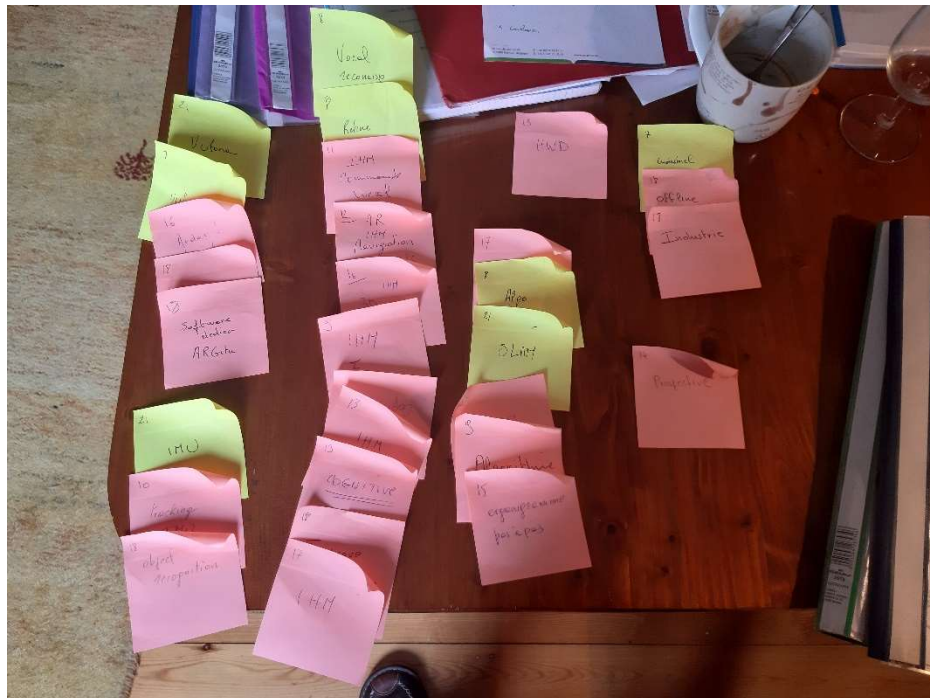


Figure 6 Post IT d'évaluation

9. Évaluer la qualité des articles trouvés

Certains articles ([6],[7]) ont été exclus de l'étude en raison de leur manque d'informations par rapport à la question. D'autres ont été inclus malgré le fait qu'ils ne satisfont pas toutes les conditions citées au chapitre 8 Méthode de sélection des articles (exemple: Pourquoi les entreprises ont besoin d'une stratégie de réalité augmentée), car ces articles offrent de nombreuses perspectives pour cette dernière.

Les "Post-It" collectés lors de l'analyse des articles ont dégagé 6 catégories. Puis sur base de contenu de la catégorie, le point commun a été déduit et nommé.

Voici ces 6 catégories:

- **Software**: que ce soient des infrastructures de développement (OpenGL) ou encore des plateformes de développement (Vuforia);
- **IHM**: tout ce qui concerne l'Interface Homme-Machine (flèche 3D, voix, etc.);
- **Phases de RA**: où trois phases ont été identifiées Authoring-Mapping-Tracking;
- **Algorithme**: proposition ou description d'algorithme utilisé dans la réalité augmentée;
- **Hardware** : comme nous avons élargi le champ de recherche à la maintenance industrielle, tout ce qui concerne les solutions matérielles utilisées (lunettes, etc.);
- **Perspectives** : ce qui n'a pas encore été fait et pourrait l'être.

Ces catégories forment le tableau ci-dessous et pour chaque "Post-It" un point a été donné, afin de constituer un classement des articles par le nombre total de "Post-It" collectés, et donc de la pertinence de leurs contenus par rapport à la question posée.

À noter que les totaux à zéro ne sont pas repris dans ce travail, malgré que leur lecture ait permis de progresser dans la recherche et les exclusions. Et que, ayant en vue la réponse à la question, les deux articles (ORB-SLAM et GSLAM) ont été écartés dans un deuxième temps au vu de leur spécialisation hors cadre. Mais ils sont conservés dans la liste pour référence future.

Le résumé des articles (chapitre 10) sera organisé suivant 4 de ces 6 catégories car les informations concernant le hardware et le software sont dispersées dans de nombreux articles.

Tableau 1 Tableau des articles "cotés"

Chap.	Article	Année	Soft.	Ph. RA	IHM	Algo.	Hardw.	Persp.	Total
5.5.1	Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces	2007			1	2			3
5.5.2	Augmented reality for assembly guidance using a virtual interactive tool	2008		3					3
5.5.3	Evaluating the Benefits of Augmented Reality for Task Localisation in Maintenance of an Armoured Personnel Carrier Turret	2009			1				1
5.5.4	Aroundplot: Focus context interface or off-screen object	2011							0
5.5.5	Exploring the Benefits of Augmented Reality Documentation for Maintenance and Repair	2011			2		1		3
	Expected user experience of mobile augmented reality services, a user study in the context of shopping centres	2013							0
5.5.6	Providing Guidance for Maintenance Operations Using Automatic Markerless Augmented Reality System	2013				1			1
5.5.7	Indoor localization and navigation using smartphones augmented reality and inertial tracking	2013	1	1		1			3
5.5.8	Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion	2014		1		2			3
5.5.9	Augmented reality for maintenance application on a mobile platform	2015		1					1
	ORB-SLAM a Versatile and Accurate	2015				1			1
5.5.10	Using Handheld Devices to Support Augmented Reality-based Maintenance and Assembly Tasks	2015			1				1
5.5.11	Challenges , Opportunities and Future Trends of Emerging Techniques for Augmented Reality-based Maintenance	2015	1	1	3			1	6
	Improving efficiency of industrial maintenance with context-aware adaptive authoring in augmented reality	2017			1				1

Chap.	Article	Année	Soft.	Ph. RA	IHM	Algo.	Hardw.	Persp.	Total
5.5.12	Augmented Reality for Maintenance	2017		2		1			3
5.5.13	Pourquoi les entreprises ont besoin d'une stratégie de réalité augmentée	2017			2			1	3
	Employing Mixed Reality Applications: Customer Experience Perspective	2018							0
	Connecting the Knowhow of Design, Production through Mixed Reality to Overcome Building's Performance Gaps	2018							0
5.5.14	Augmented Reality Approach to Domestic Maintenance Tasks	2018	1		1				2
5.5.14	Voice controller mobile android application	2018		1	1				2
5.5.16	Augmented Reality in Maintenance: An information-centred design framework	2018		1	1				2
5.5.17	A quick guide to designing for augmented reality on mobile	2018			4				4
5.5.18	A systematic review of augmented reality applications in maintenance	2018	1	2	1		1		5
	Camera localization for augmented reality and indoor positioning: a vision-based 3D feature database approach	2019							0
	GSLAM: A General SLAM Framework and Benchmark	2019				1			1
5.5.19	Opportunities for In-Home Augmented Reality Guidance	2019	1				1	1	3
5.5.20	A framework for augmented reality guidance in industry	2019	2	1		2			5
5.5.21	A practical augmented reality-assisted maintenance system framework for adaptive user support	2019	1	1	1	1	1	1	6

10. Résumé des articles collectés et sélectionnés

Dans cette partie nous allons résumer, article par article, les informations en rapport avec notre question. Pour rappel nous chercherons ici à pouvoir créer une application de maintenance domestique en réalité augmentée (nous reprendrons régulièrement l'exemple de la machine à café, mais cette application pourrait servir à d'autres usages).

Ce ne sont donc pas des résumés exhaustifs, mais bien une sélection des éléments pertinents et éventuellement les commentaires qu'inspirent ces articles vis-à-vis de l'objectif de ce mémoire.

Les commentaires sur l'article, qui seraient utiles pour notre recherche, voire pour une mise en perspective sont précédés d'une flèche de ce type:

➔ Commentaire

Certaines redites peuvent survenir dans les résumés, mais soit elles apportent une précision, soit elles aident à comprendre le reste de l'article.

10.1. Définition de la maintenance en réalité augmentée

Ces articles définissent les concepts de base et les phases d'une application de réalité augmentée ainsi que le vocabulaire nécessaire.

10.1.1. Concepts de la réalité augmentée

Source: A systematic review of augmented reality applications in maintenance

De R. Palmarini, J. Erkoyuncu, R. Roy, H. Torabmostaedi en 2017 [8].

➔ Cet article est lui-même un SLR concernant la maintenance en réalité augmentée.

P. Milgram et F. Kishino définissent la réalité augmentée comme une augmentation du monde réel avec des objets virtuels. Plus spécifiquement Azuma ajoute que la réalité augmentée doit aussi être interactive, et aligner l'objet virtuel sur le monde réel.

R. Palmarini définit la maintenance par toutes les actions effectuées pour rétablir une fonctionnalité d'un produit dans son cycle de vie.

10.1.1.1. Champs d'application de la maintenance :

Les services et la maintenance sont par nécessité des activités mobiles et sont envisagés en interaction avec des composants physiques. L'application de RA permet d'améliorer l'efficacité des interactions opérateur/machine.

Au niveau du consommateur l'article cite des exemples pour l'entretien des imprimantes et des portables. Les recherches prédisent une réduction de 30% des coûts de maintenance.

Il y a aussi la possibilité d'utiliser la réalité augmentée pour une connexion à distance avec un expert, celle-ci est plus rapide de 10% qu'une explication téléphonique.

La complexité technologique et le besoin de réduire les coûts de la maintenance en termes de temps et d'erreurs conduisent à l'utilisation de la réalité augmentée.

10.1.1.2. Opérations de maintenance :

L'avantage de la réalité augmentée est d'accomplir l'action immédiatement, sans formation ou entraînement préalable, surtout celle qui requiert la manipulation d'objets (montage d'un PC).

- ➔ L'apport d'un technicien peut s'avérer nécessaire pour les objets plus complexes, dans ce cas il y a un avantage supplémentaire en termes de coûts en cas d'utilisation d'application RA.
- ➔ Dans le cadre de ce mémoire, le démontage d'une porte de four et surtout son remontage, la procédure de détartrage d'une machine à café, seront aussi envisagés en prenant en compte la traduction du manuel papier en réalité augmentée. Cette dernière pourrait aussi afficher des résultats de diagnostic plus clairs que les maigres symboles de l'affichage classique de certains appareils.
- ➔ R. Palmarini aborde la maintenance en utilisant des HMD¹⁰, mais nous pensons que l'utilisation d'un smartphone ou d'une tablette (écran plus grand, type HHD¹¹) est une solution plus envisageable pour la maintenance domestique, tout en étant conscients qu'elle ne pourra pas remplir tous les jobs de maintenance.
- ➔ L'auteur donne comme exemple ce type d'affichage, il est cependant à noter que si ceci reste de la réalité augmentée, l'opérateur doit passer de l'écran à la réalité et donc il reste un écart cognitif ¹² important.

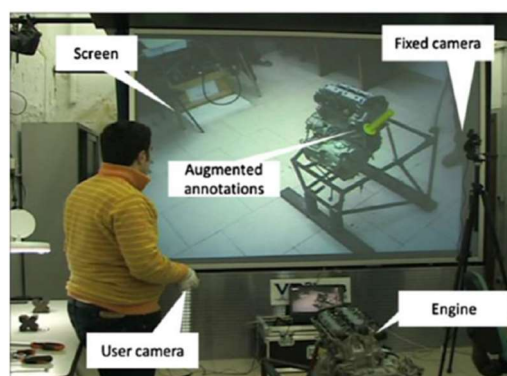


Figure 7 Application AR avec écart cognitif restant important [8]

¹⁰ Head Mounted display, Hololens et autres casques qui diffusent des applications AR

¹¹ HHD : Hand-Held Devices (smartphone) ou HAR Handled Augmented Reality

¹² Il représente le fossé entre la forme dans laquelle l'information est présentée et le contexte dans lequel elle est utilisée, voir chapitre 10.4.1 : Panorama de la réalité augmentée dans les entreprises.

10.1.1.3. Plateforme de développement

Développer une application ex nihilo assurera une très haute flexibilité, mais nécessite des techniciens de très haut niveau. L'article constate qu'il n'y a pas de consensus dans les langages de développement (C++, C#, Python,...). L'utilisation de tels langages dits de "haut niveau" (à savoir plus proches du langage humain que du langage machine) ne rendent pas le développement moins ardu et ce, même on s'aide des bibliothèques de fonctions (OpenCv¹³, OpenGL¹⁴).

L'article cite aussi des logiciels de création 3D venant de l'univers du jeu : "Unity3D", "Unreal", "Rhinocéros", "SolidWorks", "Catia" et "3dsma". Mais signale que les plus couramment utilisés sont "Unity3D" et "Unreal", car ils ont une interface conviviale qui permet de créer une application simplement.

10.1.1.4. Visualisation

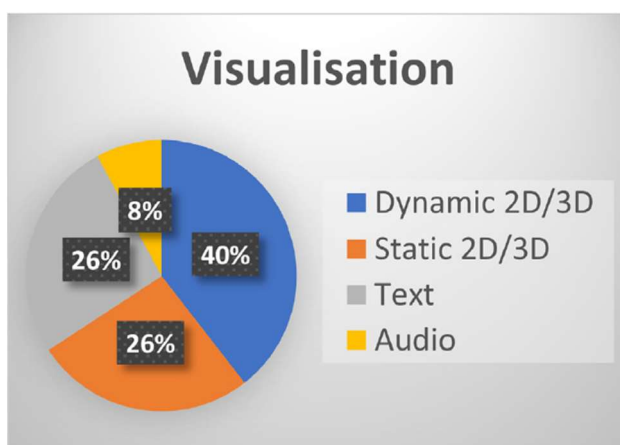


Figure 8 Répartition des Interactions RA/utilisateur[8]

Pour l'interaction il constate que la méthode la plus courante est l'utilisation de flèches 2D et 3D, mais que les flèches animées sont plus courantes que les statiques.

Les inclusions de texte sont souvent utilisées, mais il faut veiller à ce qu'elles n'obstruent pas le FOV (Field Of View).

Et qu'enfin les ajouts de commentaires vocaux sont moins utilisés (8% dans la Figure 8), bien que cette portion ne prenne pas en compte la reconnaissance vocale.



¹³ <https://opencv.org/> Open Source Computer Vision : initialement développée par Intel, c'est une bibliothèque spécialisée dans le traitement d'images en temps réel.



¹⁴ <https://www.opengl.org/> Open Graphic Library : ensemble normalisé de fonctions de calcul d'images 2D ou 3D.

10.1.1.5. Solution de tracking:

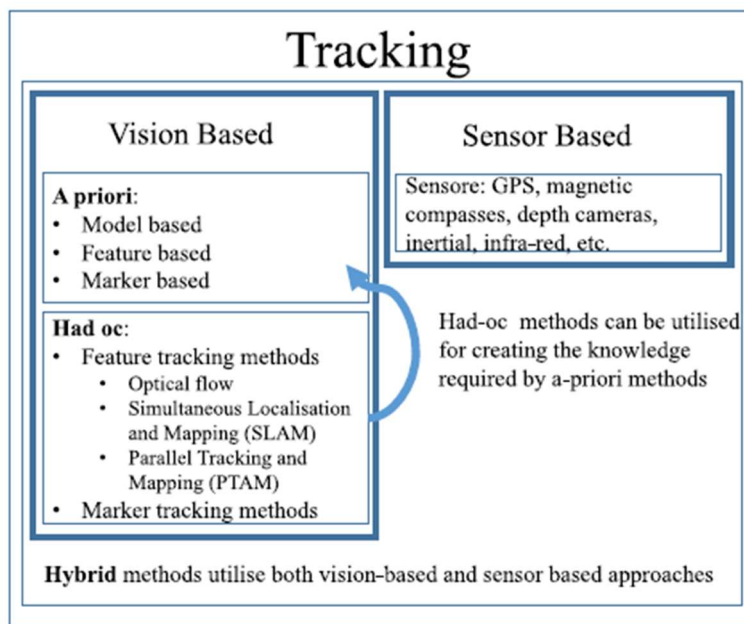


Figure 9 Tracking

Le Tracking est l'un des principaux sujets de recherche sur la réalité augmentée. Il est basé sur le visuel et/ou les senseurs.

- Les différents senseurs dépendent de la plateforme hardware envisagée. Ils peuvent être inertiel, gyroscopique, magnétique (compas) ou bien encore GPS¹⁵.
- L'acquisition du réel est basée soit sur la reconnaissance d'une image, d'un modèle CAO¹⁶ ou encore par l'utilisation de marqueurs.

Quand le Tracking utilise ces deux sources de localisation, on parle de Tracking hybride.

➔ L'application de l'annexe 17.2 utilise un Tracking hybride.

Quant au Tracking lui-même, les algorithmes de "SLAM" et "PTAM" (Parallel Tracking and Mapping) sont utilisés, voir pour plus de détails l'article de S. Patra [9].

10.1.1.6. Solution d'Authoring

C'est le processus qui crée le contenu digital d'une application augmentée. Les auteurs citent trois approches méthodologiques pour l'Authoring :

- L'annotation : éclairage d'un objet, étiquette de texte;

¹⁵ Global Positioning System, système de géolocalisation par satellite.

¹⁶ Conception Assistée par Ordinateur (CAD Computer Aided Design)

- La boîte :

Il est nécessaire d'introduire le concept de "boîte", utilisé par V. Havard [10]. Chaque élément est une boîte. La combinaison de ces boîtes constitue la tâche de maintenance.

- Entité: la plus petite partie -celle qui ne se divise pas- à manipuler (un bouton, une vis);
 - Entité externe: la plus petite partie externe (tournevis, clef);
 - Actions: l'activité à faire (visser, tirer);
 - Maintenance: une série d'actions;
 - Opération: liste de maintenance.
- L'automation: c'est la méthode la plus ambitieuse, les procédures sont créées automatiquement à partir des informations contenues dans le modèle CAO.

10.1.1.7. Futur de la réalité augmentée

Hardware:

Il y aura sûrement une amélioration des capacités au niveau énergie, puissance de calcul, définition et surtout l'ajout de senseurs et de capacités haptiques (qui concernent le toucher).

Mapping et Tracking:

Le futur vient de l'intégration de modèles CAO et l'amélioration du Tracking par la recherche algorithmique.

Réalité augmentée et l'expérience de l'utilisateur:

L'amélioration de l'Authoring, qui devrait être adaptative, en analysant les données collectées sur l'utilisateur.

➔ On recommande d'avoir une application qui s'adapte à l'utilisateur (voir 10.2.11 Adaptation d'une application de AR à son utilisateur).

10.1.2. Senseurs et "Vuforia"

Source: Indoor localisation and navigation using smartphones augmented reality and inertial tracking.

De B. Delail, L. Weruaga, M. Zemerly en 2013 [11].

Cet article décrit une application de réalité augmentée pour aider les clients d'un hôtel à se déplacer à l'intérieur de celui-ci.

Mais la position obtenue par GPS diminuant fortement à l'intérieur des bâtiments, les auteurs proposent d'améliorer la précision en se basant sur :

- Des marqueurs (voir chapitre 10.1.7: Définition des marqueurs (markers) et de l'occlusion);

- La reconnaissance d'image (de couloir, de porte) dans une base de données présente dans le cloud (fonctionnalité offerte par le logiciel "Vuforia" [2]);
- Les senseurs (compas, accéléromètre, gyroscope) pour le suivi des mouvements.

L'auteur signale que "Vuforia" permet aussi d'afficher des boutons et autres informations à leur place correcte dans la réalité augmentée.

→ Cet article apporte peu de détails, mais souligne l'utilisation intensive des senseurs pour le tracking, ce qui semble une bonne idée pour notre application de maintenance domestique, et met en évidence l'intérêt de la plateforme de développement "Vuforia".

10.1.3. Fast tracking grâce aux senseurs

Source : Augmented reality for maintenance applications on a mobile platform.

De N. Lakshmpurba, P. Mousoulitis, L. Petrou, S. Kasderidis, O. Beltramello en 2015[12]

La principale tâche de la maintenance en réalité augmentée est l'évaluation de la position exacte d'un objet, pour placer correctement les contenus virtuels (Mapping) et ensuite la correction de cette position en fonction des mouvements de la caméra (Tracking), ce qui demande une forte puissance de calcul.

Pour réduire les calculs, l'auteur introduit du fast tracking à l'aide de l'accéléromètre d'un smartphone (IMU: Inertial Measurement unit).

→ Ce senseur mesure les déplacements du smartphone, comme le démontre la figure suivante :

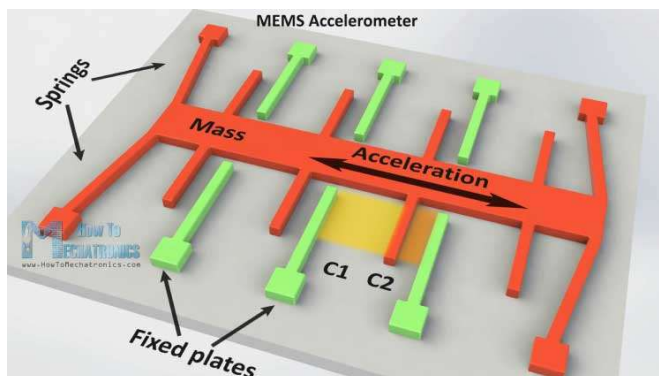


Figure 10 Schema d'un Accéléromètre [13]

→ Quand cette tige de silicium est chargée électriquement et la cage dans laquelle elle se trouve également, le déplacement de charges portées sur la tige est détectable et on en déduit le sens du déplacement, trois tiges de ce type couvrent les axes X,Y,Z [13]

En combinant les informations venant de la caméra et du senseur, le tracking est plus efficace.

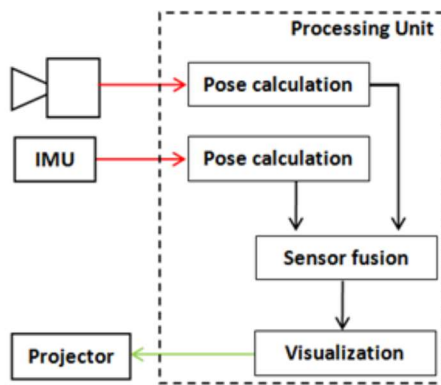


Figure 11 Algorithme AR et IMU

→ Cette idée d'amélioration du tracking par l'IMU pourrait être généralisée aux autres senseurs présents dans un smartphone (GPS...).

10.1.4. Formalisation de la tâche d'Authoring

Source: Challenges, Opportunities and Future Trends of Emerging Techniques for Augmented Reality-based Maintenance

De A. Sanna, F. Manuri, F. Lamberti, G. Paravati, P. Pezzolla en 2015 [14].

Les coûts de la maintenance sont élevés et toute technologie permettant de les réduire est intéressante. Le coût cognitif et le nombre d'erreurs peuvent être réduits par une application de réalité augmentée (25 % en moins pour les coûts et 30 % en plus pour la performance par rapport à des modes d'emploi papier).



Figure 12 Réparation d'un PC en réalité augmentée (Easer-R³)

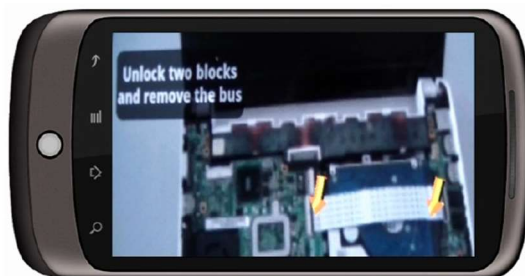


Figure 13 Écran AR pour la réparation de PC (EASER-R³)

→ On remarque les deux flèches jaunes qui indiquent la pièce à démonter.

→ Dans cet article l'auteur parle aussi du Mapping par image ou par modèle CAO, mais il ignore l'utilisation potentielle des marqueurs.

Les auteurs formalisent la création des tâches de maintenance¹⁷:

- Tout d'abord il faut établir une liste d'actions: visser/dévisser, connecter/déconnecter, ouvrir/fermer...) à effectuer pas à pas;
- Puis on liste les parties de l'objet concerné: pour un portable par exemple, le capot, la batterie, etc.;
- Et enfin on assemble une liste d'actions associée à un élément physique qui déroule la procédure choisie.

La proposition d'un software permettant de configurer cette liste et de l'envoyer par XML¹⁸ à l'application de réalité augmentée semble permettre une bonne flexibilité.

L'auteur ajoute aussi une possibilité qu'un expert modifie ladite procédure à la volée, pour résoudre le problème rencontré et non pris en compte par la procédure (voir vidéo¹⁹).

10.1.5. Occlusion et Parallaxe

Source: Opportunities for In-Home Augmented Reality Guidance

De J. Herskovitz, E. Ofek, W. Lasecki, A. Fourney en 2019 [4].

La possibilité de porter des applications de maintenance industrielle dans le monde domestique est limitée. La spécificité hardware (par exemple pour déterminer la position de l'utilisateur et de l'objet) et les conditions d'environnement (luminosité, encombrement) nécessaires aux applications industrielles ne sont pas présentes dans le monde domestique. Mais le Tracking a commencé à résoudre ces problèmes.

Les tests montrent que les utilisateurs de réalité augmentée commettent nettement moins d'erreurs qu'avec une méthode traditionnelle, mais l'auteur constate qu'il reste des problèmes :

- d'occlusion: l'occlusion correspond au recouvrement partiel d'un objet par un autre, entraînant une illusion de profondeur (superposition d'éléments situés à des hauteurs différentes). À partir de cette information perceptive, le cerveau humain incorpore une troisième dimension alors que le schéma n'implique que deux dimensions [5];
- de parallaxe: l'être humain n'est jamais parfaitement immobile. Lorsque nous bougeons, au niveau de la perception oculaire, les objets proches se déplacent plus que les objets lointains [5].

¹⁷ A mettre en relation avec le chapitre 10.2.2 Modélisation des tâches de maintenance (Vats)

¹⁸ Extensible Markup Language, langage de balisage extensible qui est un métalangage permettant l'échange de données complexes



¹⁹ <https://www.youtube.com/watch?v=MyAvoMJXxdk>

10.1.6. Utilisation de la CAO pour le Mapping

Source: A framework for augmented reality guidance in industry

De J. Zubizarreta, I. Aguinaga¹, A. Amundarain en 2018 [15]

Cet article présente une infrastructure de développement complète permettant de créer une application de réalité augmentée industrielle pour la maintenance. Les auteurs utilisent un écran fixe, car, pour eux, les HMD ne sont pas utilisables de manière ergonomique sur le long terme (ils engendrent de la fatigue entre autres), et les HHD réduisent la dextérité de l'opérateur (les mains encombrées).

Les auteurs justifient le choix de la réalité augmentée, car elle accroît les performances de 79% et diminue les erreurs de 92% dans des opérations de maintenance [3].

Au niveau algorithmique il écarte "SLAM" en cas de scène dynamique et le "Deep Learning 6D"²⁰, car cet algorithme échoue quand 20% de l'objet à repérer sont cachés (occlusion), et de plus, beaucoup de ces méthodes échouent quand l'éclairage change.

➔ Un graphe de J. Claraco explique 6D (Figure 14): 3 dimensions (x,y,z) pour la position dans l'espace, par exemple un dé à jouer, et 3 dimensions pour donner son orientation dans l'espace (x',y',z'), quelles faces sont visibles?.

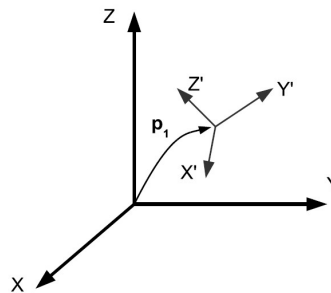


Figure 14 6D pose

Suite à une analyse de l'environnement, les auteurs posent comme hypothèse qu'ils vont chercher un objet dans un environnement "encombré".

²⁰ Utilisation de réseau de neurones artificiels pour obtenir la position (3D), la taille et l'orientation (vecteur 3D) de l'objet à chercher [44].

La méthode qu'ils utilisent dans le cadre de cet environnement est l'AR pipeline.

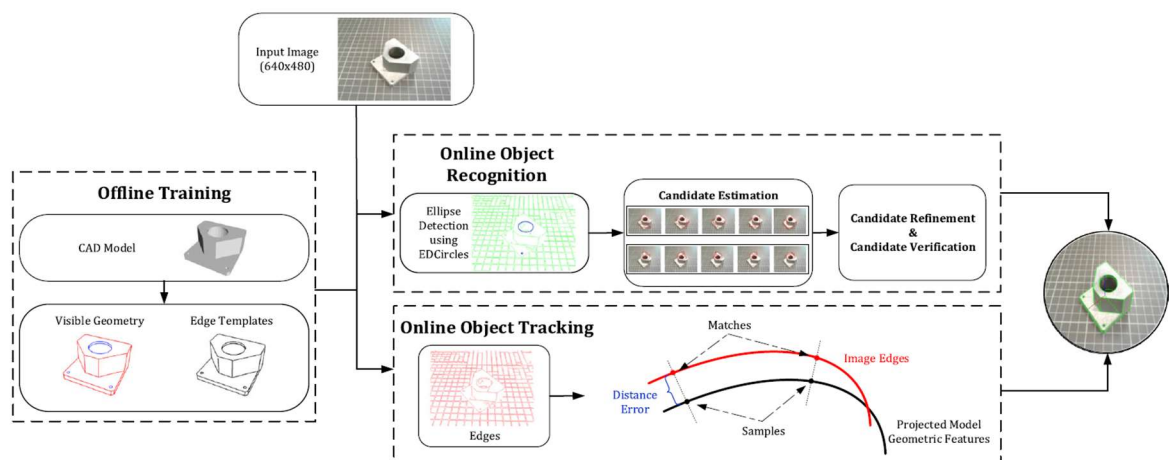


Figure 15 Pipeline AR

Nous allons parcourir ce diagramme en passant en revue ses 3 composants et ses résultats:

1. Offline training;
2. Online Object recognition;
3. Online Object Tracking;
4. Les résultats obtenus par cet AR Pipeline.

1. Offline training:

Entraînement: il doit se faire hors ligne à partir de modèles CAO comme le montre la Figure 16. L'application analyse le modèle en plaçant une caméra sur une sphère pour voir l'objet sous tous les angles possibles et enregistre les résultats dans une table.

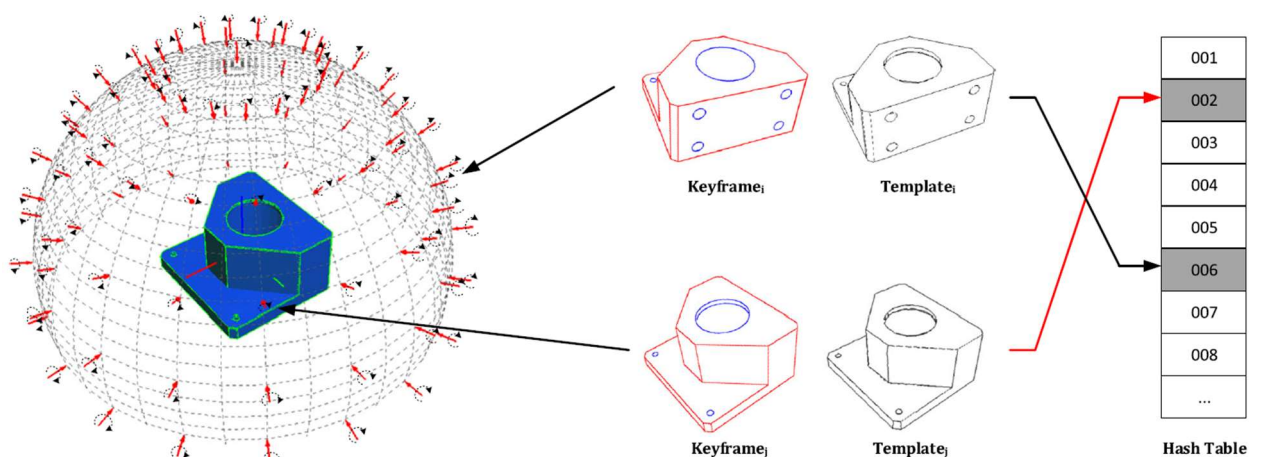


Figure 16 Caméra sphérique

2. Online Object recognition:

"Argitu", le Framework développé par les auteurs, que décrit cet article présuppose que pour rechercher l'objet il faut d'abord obtenir les cercles et les ellipses de l'image, puis il les compare avec les données obtenues par la camera (Figure 16), et par affinages²¹ successifs en diminuant les écarts entre la position estimée et l'image. On obtient ainsi la position de l'objet.

3. Online Object Tracking:

"Argitu" opère de la même manière que dans la phase précédente, c'est-à-dire qu'il fait une projection des positions possibles dans l'image et qu'il choisit le candidat qui minimise l'écart entre cette projection et l'image.

4. Les résultats obtenus:

L'auteur assure que cet AR pipeline est plus performant en termes de vitesse et de précision que les algorithmes précédemment cités. Les résultats de l'expérimentation, par exemple pour la reconnaissance d'objets partiellement cachés:

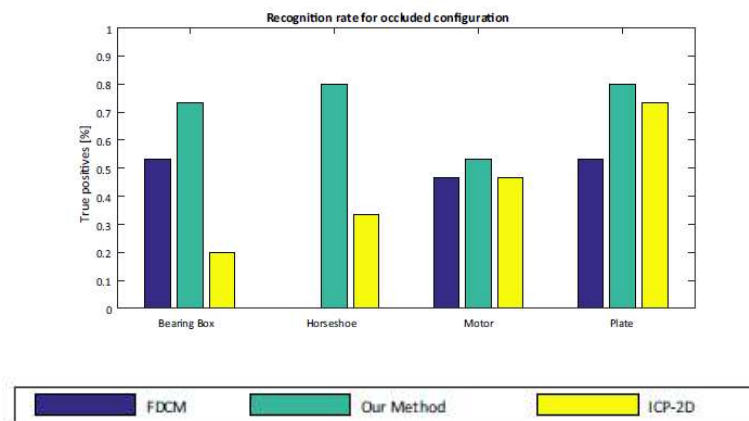


Figure 17 Taux de réussite de reconnaissance d'objets occultés ("Argitur")

➔ Mais les informations algorithmiques ne sont pas exploitables (pas de détails) et le logiciel "Argitu", cité dans cet article, n'est pas disponible sur internet. Par contre l'analyse des modèles CAO est adaptée à notre propos.

²¹ Dans le texte "refinement"

10.1.7. Définition des marqueurs (markers) et de l'occlusion

Source: Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion.

De S. Garrido-Jurado, R. Muñoz-Salinas, F.J. Madrid-Cuevas, M.J. Marín-Jiménez en 2014 [16].

Les marqueurs "fiduciaux" (à qui l'on peut faire confiance) sont faciles à détecter, avec précision et rapidité. Ils permettent de positionner la caméra dans l'espace et d'obtenir la position 6D.

Chaque catégorie de marqueur peut être définie par un dictionnaire (ensemble de marqueurs d'une même classe), celui-ci ne doit être ni trop grand, ni trop petit, pour permettre d'identifier au mieux tous les besoins de l'application.

Voici quelques exemples de marqueurs fiduciaux:

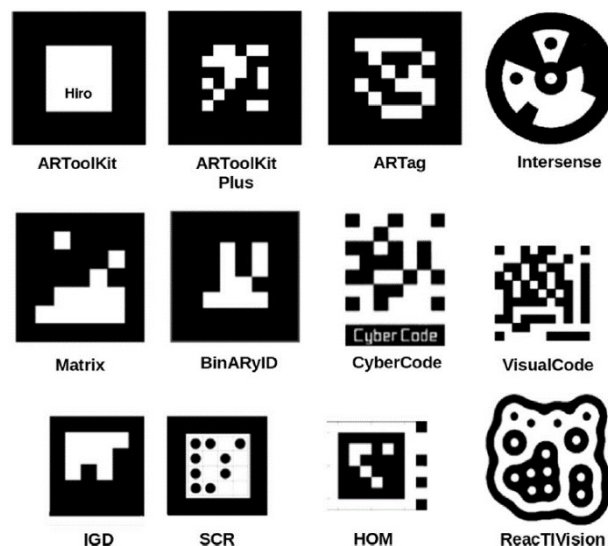


Figure 18 Exemples de marqueurs

Cybercode et **Visualcode** : dérivé du code 2D-barcode (comme les QR codes).

ReacTIVision : basé sur la détection de taches, il utilise des algorithmes génétiques, mais il pose des problèmes de position et est sensible aux différences d'éclairage.

Intersenses : contient moins d'informations que les marqueurs carrés.

Une bonne alternative est un marqueur carré. Les marqueurs carrés sont préférables aux marqueurs ronds, car les premiers donnent leurs quatre coins et une position fiable, tandis que les seconds n'offrent que leur centre - toutefois de manière plus précise que le coin d'un carré - il faut donc en utiliser plusieurs pour obtenir une position de la caméra.

ARtoolkit : sa méthode d'identification par modèle conduit à de faux positifs et il est très sensible aux différentes conditions d'éclairage.

- À tester sur sa nouvelle version ARtoolkitX (voir 11.3 Algorithme d'aide pour la réalité augmentée).

Matrix : c'est le plus simple, avec des bits redondants pour la correction d'erreur.

ARtag : même principe que "Matrix", mais avec une amélioration de la robustesse vis-à-vis de l'éclairage et d'occlusion partielle. Ce type de marqueur permet des brèches dans les côtés du marqueur. De plus, si on utilise plusieurs marqueurs simultanément, on peut se permettre l'occlusion de certains d'entre eux.

ARtoolkit plus : apporte des améliorations à "ARtoolkit".

- Mais il n'y a plus de suivi depuis 2017²², voir sans doute ARtoolkitX et le chapitre 11.4: Évaluation des logiciels nécessaires pour établir une application de réalité augmentée.

SCR, HOM, IGD : sont des marqueurs utilisés par le projet "ARVIKA"²³.

- Mais comme celui-ci semble arrêté, peu d'informations sont connues.

BinARyID : créé pour réduire les ambiguïtés dues à une rotation, mais ne possède pas de détection d'erreur.

Cet article propose une méthode pour générer un dictionnaire de marqueurs configurables (nombre de marqueurs disponibles), pour maximiser la distance inter marqueurs (pour empêcher la confusion) et des bits de corrections d'erreurs qui permettent de détecter et de corriger les erreurs de lecture.



Figure 19 Exemples de marqueurs générés



²² <https://github.com/paroj/artoolkitplus>

²³ Le projet ARVIKA est parrainé par le BMBF (ministère allemand de l'éducation et de la recherche) et supervisé par le DLR (centre aérospatial allemand). Il se concentre sur le développement, la production et le service de produits et systèmes techniques complexes. Mais il semble être arrêté aussi.

Plusieurs phénomènes peuvent empêcher la détection des marqueurs :

1. Lorsqu'un objet apparaît dans la scène de réalité augmentée, il faut gérer sa présence par rapport aux objets virtuels, on parle alors d'occlusion. L'exemple ci-dessous est tiré de cet article:

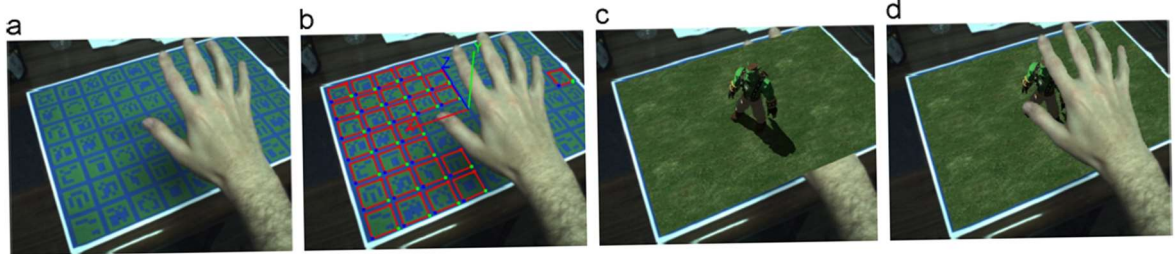


Figure 20 Exemple de réalité augmentée (a) Scène initiale comportant les marqueurs (b) les marqueurs sont détectés et utilisés pour trouver la position de la caméra (c) réalité augmentée avec un problème d'occlusion (d) et enfin sans problèmes d'occlusion

- Utiliser la profondeur : requiert des senseurs de profondeur (stéréo par exemple);
 - Avoir des modèles : posséder à l'avance les modèles des objets qui vont occulter;
- ➔ À l'avance ? Cela semble être impossible pour notre application.
- Définir une couleur : créer un modèle de la couleur de fond comparée aux couleurs des objets en avant-plan.

La solution retenue est la couleur, car augmenter le contraste chromatique permet d'améliorer la segmentation des couleurs. Cet article, par expérimentation, a pu confirmer que le bleu et le vert améliorent la détection d'occlusion et la segmentation chromatique.

➔ Pour comprendre la segmentation chromatique, l'article de J. Angulo [17] donne cet exemple :



Figure 21 Segmentation chromatique [17]

2. La confusion :

La création de dictionnaires à la demande, en ayant comme paramètre le nombre de marqueurs, et en maximisant la distance entre eux pour éviter la confusion est obtenue par l'utilisation d'un algorithme stochastique²⁴.

²⁴ Algorithme non déterministe comportant des choix rendus aléatoires et donc ne donnant pas la même réponse lors de deux exécutions successives.

3. Le "Vertex jitter" est l'ensemble de perturbations optiques dans la localisation des coins d'un marqueur.

Dans tous les cas, détecter un seul marqueur peut échouer pour différentes raisons telles qu'un faible éclairage, un mouvement rapide de la caméra ou encore une occlusion. Une solution est de multiplier les marqueurs.

- ➔ L'utilisation des marqueurs, collés sur les appareils pour lesquels une application de réalité augmentée sera nécessaire, facilitera l'identification et la phase de Mapping.

10.1.8. Que retenir ?

- Flèches 3D et 2D pour la navigation;
- Création 3D : "Unity3D", "Unreal", "Rhinocéros"...;
- Phases d'une application de réalité augmentée: Authoring – Mapping – Tracking;
- Maintenance: liste d'actions, liste d'objets, et association de l'un avec l'autre;
- Gain en efficacité si il y a appel aux experts;
- Vuforia : un outil permettant le stockage en ligne et le Tracking par senseurs;
- Fast Tracking grâce aux senseurs;
- Utilisation de la CAO comme aide au Mapping;
- Marqueur pour le Mapping : QR code adapté à une réalité augmentée facilitant le Mapping;
- Occlusion, Vertex jitter.

10.2. Interface Homme Machine

L'interface homme-machine (IHM) est l'interface utilisateur qui relie l'opérateur à une application ou à un dispositif de commande matériel.

Dans notre cas, ce sont toutes informations permettant de faciliter l'expérience de l'utilisateur (UX²⁵) lors de l'utilisation d'une application de réalité augmentée.

10.2.1. Réparer un vélo grâce à une application de réalité augmentée

Source: Augmented Reality Approach to Domestic Maintenance Tasks

De J. Martín-Gutiérrez and I. Inés Santos Pérez en 2011 [18].

Quand la réalité augmentée est utilisée dans la maintenance industrielle, elle donne de bons résultats (que ce soit dans l'armée pour la maintenance d'une tourelle de char (voir chapitre 10.2.3:Taux d'erreur et ergonomie d'une application de RA), chez Boeing pour le montage d'ailes ou chez BMW dans ses chaînes de production), on peut donc imaginer qu'elle donnera d'aussi bons résultats dans la maintenance domestique.

Cet article décrit la création d'un manuel de réalité augmentée générique basée sur "Andar", plateforme de développement RA de Google.

→ "Andar" a été abandonné en 2014 par "Google", donc après la parution de l'article.

Les auteurs ont conçu une application RA sur base du manuel de changement de braquet sur un vélo. Ils pensent que cette application pourrait être généralisée à l'installation et la configuration d'enregistreur TV, hifi, home cinéma, etc.

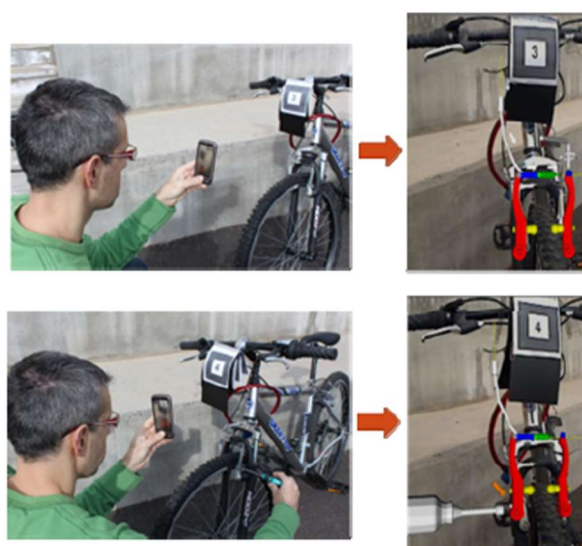


Figure 22 Réparation RA d'un vélo

²⁵ L'expérience utilisateur, aussi connue sous les acronymes EU ou plus couramment UX, est une notion de plus en plus courante là où l'on utilisait, encore récemment, les notions d'ergonomie des logiciels et d'utilisabilité. (Wikipédia)

- Ce projet de 2011 semble avoir été arrêté avec l'abandon d'"Andar", néanmoins on peut imaginer le développement futur d'une telle application.

10.2.2. Modélisation des tâches de maintenance (Vats)

Source: Augmented reality for assembly guidance using a virtual interactive tool

De M. Yuan, S. Ong, A. Nee en 2007 [19].

Dans une procédure d'assemblage, l'utilisateur doit toujours jongler entre le papier et un écran d'ordinateur ou un site web et la réalité, il y a donc une divergence d'attention qui peut causer des erreurs ou de la fatigue. La réalité augmentée peut supprimer cette divergence.

Cet article décrit deux outils pour faciliter l'interaction avec l'utilisateur dans une application de réalité augmentée d'aide à l'assemblage d'un PC, par exemple:

- "VirIPs" (Virtual interaction Panel, panneau interactif virtuel) est un panneau virtuel composé de boutons, que l'on peut sélectionner à l'aide d'un crayon, pour progresser dans l'action d'assemblage.

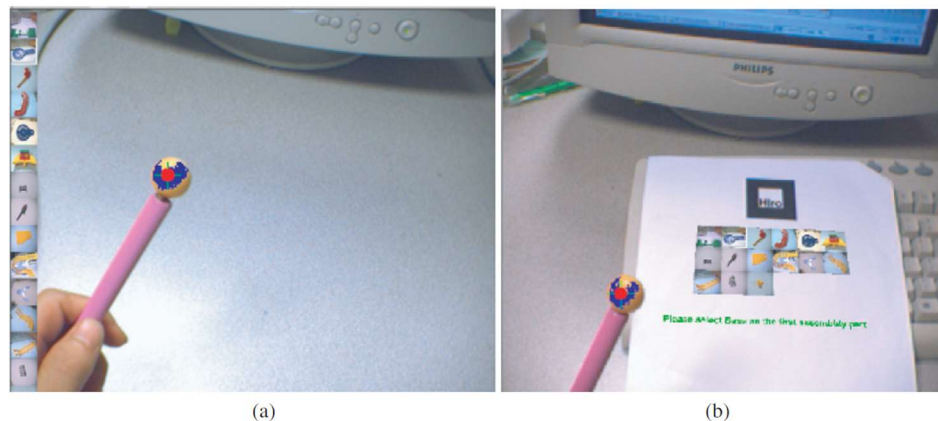


Figure En (a) on voit le crayon pointeur VirIPs à gauche (les boutons), et en b sur une feuille virtuelle

- "Vats" (Visual assembly tree, structure arbre de tâches) est un arbre hiérarchique facile à modifier (par une application visuelle) qui liste les tâches de l'opération d'assemblage.

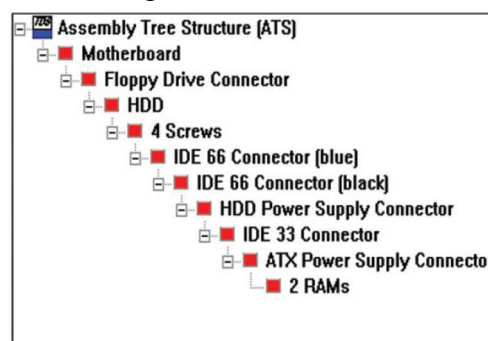


Figure 23 L'arbre de construction d'un PC (Vats).

- ➔ Dans notre application de réalité augmentée, il faudrait analyser les mouvements de la main, que ce soit en cas de maintenance (vérifier si la position de la main est correcte) ou dans le cas d'un panneau de commande virtuel (quels boutons sont activés?).
- ➔ Une autre possibilité pour notre application serait d'y enregistrer un pointeur (un crayon, un tournevis, ou même une fourchette) ; mais la feuille de commande "VirIPs" semble être trop grande pour notre taille d'écran. Par contre les arbres "Vats" semblent être une bonne solution pour hiérarchiser les tâches de maintenance de plusieurs appareils. Le concept de boîte évoqué dans l'article au chapitre 10.1.1 Concepts de la réalité augmentée, pourrait aider à sa formalisation.

10.2.3. Taux d'erreur et ergonomie d'une application de RA

Source: Evaluating the Benefits of Augmented Reality for Task Localisation in Maintenance of an Armoured Personnel Carrier Turret.

De S. Henderson, S. Feiner en 2009 [20].

Cet article décrit un système de réalité augmentée pour la maintenance des tourelles de char, endroits clos et circulaires.

- ➔ Les informations concernant le matériel (hardware) sont dépassées, car l'article date de 2009.

En réalisant des tests avec plus de 18 techniciens, les auteurs démontrent les avantages d'une telle application en termes de mouvements du torse et de la tête et constatent que le taux d'erreur lors de la maintenance assistée décroît fortement, permettant d'envisager un futur pour les applications de réalité augmentée.

Dans les perspectives ils évoquent une amélioration du FOV (en termes de définition d'écran) car les utilisateurs se plaignent d'un inconfort lors de leur journée de travail, mais ils utilisent un HMD.

- ➔ Les HMD ne sont pas visés par la recherche de ce mémoire, mais il est intéressant de garder ce type d'affichage à l'esprit, s'il commençait à se généraliser et surtout à se démocratiser. Un exemple actuel des HMD est les "Hololens de Microsoft".

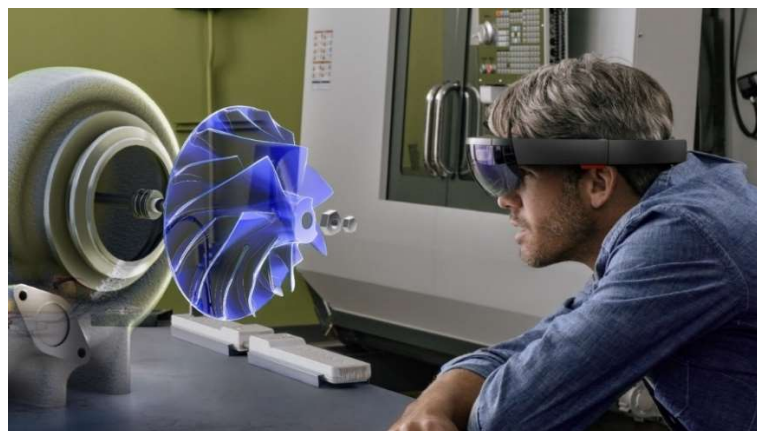


Figure 24 HMD : Microsoft Hololens [21]

- ➔ Plus de détails dans l'article 10.2.5 Navigation AR : flèche 2D et 3D.

10.2.4. Navigation AR : vue Fish-eyes'

Source: Aroundplot: Focus context interface for off-screen objects in 3D environments.

De H. Jo, S. Hwang, H. Park, H. Ryu, J Hee en 2011 [22].

Plusieurs méthodes d'approche existent pour naviguer dans un espace plus grand que l'écran, A. Cockburn [23] en donne deux pour y arriver:

- "Overview+detail" (O+D) : une vue d'ensemble accompagne la vue de détails;
- "Focus+context" (F+C) : focale sur le détail et Fish-eyes.

Les applications de réalité augmentée sont souvent confrontées au problème des objets hors écran. La solution la plus souvent utilisée est une "fenêtre type radar 2D" montrant une vue globale, mais quand elle est appliquée aux environnements 3D, elle devient difficile à utiliser (application de O+D).

Des flèches 3D ont été aussi proposées, mais deux problèmes subsistent. Premièrement si l'on veut signaler un objet derrière la tête, l'utilisateur pourrait penser qu'il suffit de lever la tête ! Deuxièmement ces flèches vont encombrer l'écran et si on les réduit elles deviennent illisibles.

Pour répondre à ces deux problèmes, H. Jo propose 2 techniques appliquant le F+C :

- La méthode de mappage : transformer les coordonnées sphériques vers une représentation 2D de type Fish-eyes orthogonale. Ceci permet d'améliorer la visibilité sur un espace réduit sans encombrer l'écran. Pour comprendre le Fish-eyes, M Sarkar [24] donne les schémas suivants :

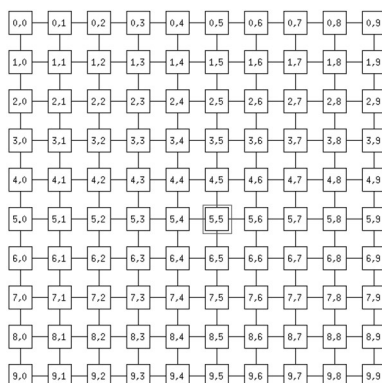


Figure 25 Vue globale sans modification

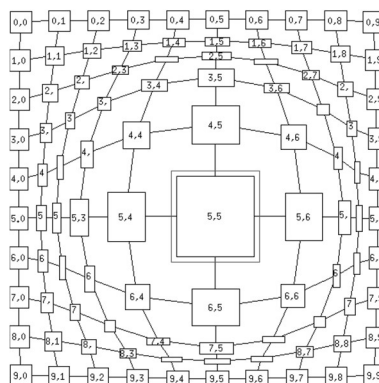


Figure 26 'fish eyes' sphérique

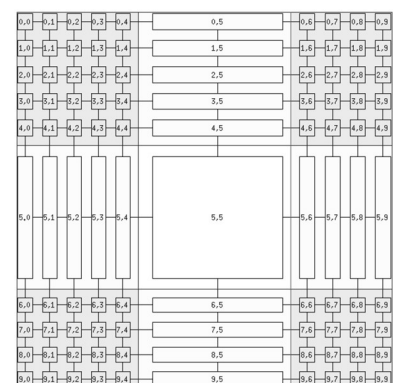


Figure 27 'fish eyes' orthogonale

Ou encore dans l'article :

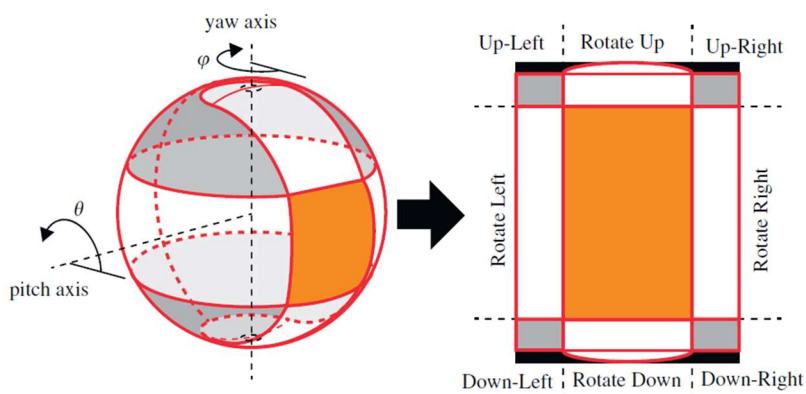


Figure 28 Coordonnées 3D vers Fish-eyes orthogonal

- Le grossissement dynamique: dans une Fish-eyes il faut sélectionner un élément de la vue pour l'agrandir, J. Hyungeun propose que cet agrandissement soit dynamique (automatique) et ce, dans la direction que le logiciel a détectée suite à un mouvement de la caméra ou de l'utilisateur.

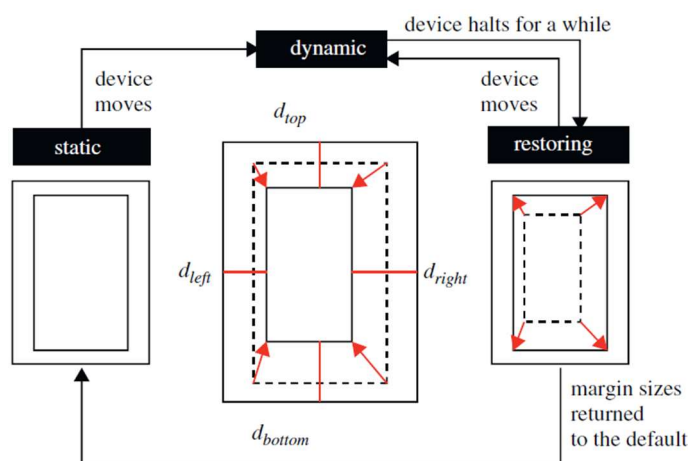


Figure 29 Diagramme d'état de l'agrandissement dynamique d'"Aroundplot"

Les tests montrent que cette méthode de navigation ("Aroundplot") est aussi efficace voir meilleure pour le temps moyen d'accomplissement d'une tâche, mais que le nombre d'erreurs est nettement moins élevé que dans les autres méthodes de navigation.

- ➔ Cette méthode est surtout intéressante pour les espaces de travail plus grands que le FOV et un grand nombre d'objets. Dans le cas d'une application domestique (plan de travail d'une cuisine ou focus sur la machine à laver) il y a moins d'intérêt. Mais il est utile de se souvenir de cette méthode "Aroundplot" en cas de besoin.

10.2.5. Navigation AR : flèche 2D et 3D

Source: Exploring the Benefits of Augmented Reality Documentation for Maintenance and Repair.

De S.Henderson, S. Feiner en 2011 [25].

Toute activité de maintenance se divise en deux classes : cognitive et psychomotrice.

- la classe cognitive inclut la localisation, la compréhension des instructions, et le transfert des instructions dans le monde physique.
- la classe psychomotrice inclut la comparaison, l'alignement, l'ajustement, et toute autre manipulation physique.

La réalité augmentée apporte une aide sur ces deux classes.

Le cadre de l'expérience est une tourelle de char en maintenance (faible volume et circulaire).

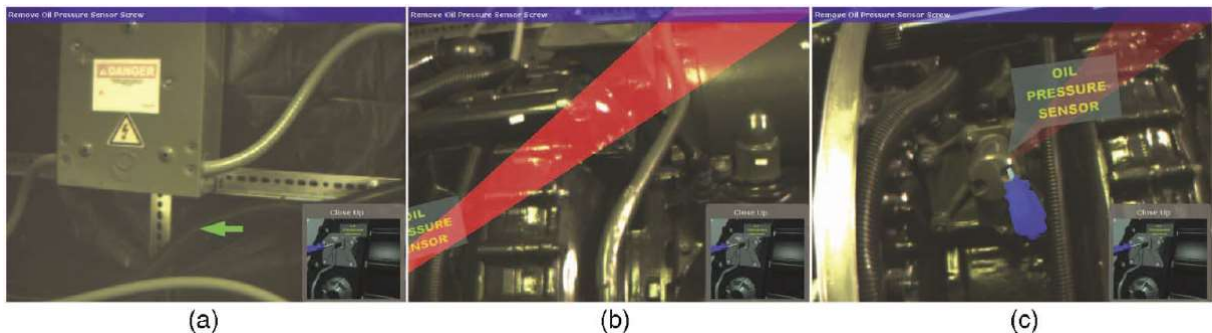


Figure 30 RA pour une tourelle de char

M Henderson souligne 4 éléments intéressants pour une application de RA :

1. Informations de direction (flèches 2D et 3D dynamique [plus la largeur diminue, plus on est proche de la destination], sur respectivement (a) et (b));
2. Texte expliquant les instructions(en haut des 3 images);
3. Label localisant le composant à opérer (c);
4. Des modèles 3D des outils (ici un tournevis en bleu (c)).

Le résultat de leur application montre que la réalité augmentée peut réduire le temps pour localiser la tâche à effectuer et qu'elle réduit les mouvements de la tête et du cou.

➔ Cette étude se penche sur des applications spécifiques pour chaque classe de technicien, et s'inspire plus du taylorisme que de la recherche sur les évolutions possibles de la RA, et ce dans un secteur de niche (les tourelles de char). Mais il propose de bonnes idées quant aux ajouts RA (flèche 3D rouge qui indique une position hors écran), tandis que les informations logicielles et matérielles sont obsolètes (2011).

10.2.6. Caractérisation de l'Authoring

Source: Augmented Reality in Maintenance: An information-centred design framework

De I. Fernández Del Amo, J. Erkoyuncu, R. Roy, S. Wilding en 2017 [26]

Authoring : c'est la phase qui vise à créer et éditer le contenu ajouté (PDF, image, annotation, vidéo) dans une application de RA, ce contenu étant nécessaire à toutes les étapes de la réparation.

L'Authoring doit surmonter quatre défis qui sont relevés dans cet article:

1. La réalité augmentée doit être facile d'utilisation pour tout type de public afin d'effectuer facilement les transferts de connaissances vers l'utilisateur;
2. L'application doit prendre en compte les défis de visualisation tels que l'occlusion ou le photoréalisme²⁶: il faut faire en sorte que les ajouts de RA soient les plus efficaces;
3. La gestion du type d'affichage : définir quelles informations et sous quel format elles seront affichées dans le but d'améliorer la performance de l'opérateur;
4. La gestion de l'interaction entre l'opérateur et l'application (geste, voix), mais aussi la gestion des données obtenues de l'opérateur quant à son utilisation de l'application.

Les applications de réalité augmentée doivent être adaptables à leur contexte, pour acquérir et analyser les données de leur environnement et les prendre en compte.

Pour les applications d'Authoring, les auteurs précisent deux types de données dont l'acquisition peut améliorer l'efficacité de la maintenance en RA:

- Au niveau des données utilisateur : l'application de RA doit les interroger²⁷ et s'adapter aux performances de son utilisateur (expert...néophyte) pour modifier le nombre et le format des données affichées en fonction de son niveau;
- Au niveau des données d'environnement: les données contextuelles provenant de la caméra et des senseurs en temps réel peuvent amener l'application à modifier l'aide à l'utilisateur.

²⁶ Le photoréalisme qualifie un rendu visuel qui tend à ressembler à une photographie. Pour l'utilisateur, par exemple, le tournevis doit être immédiatement identifiable.

²⁷ L'article 10.2.11 Adaptation d'une application de AR à son utilisateur propose une collecte de données implicite ou explicite.

10.2.7. Test d'une application de réalité augmentée pour la maintenance d'un PC

Source: Using Handheld Devices to Support Augmented Reality-based Maintenance and Assembly Tasks.

De A. Sanna, F. Manuri, F. Lamberti, G. Paravati, P. Pezzolla en 2015 [27]

La maintenance et les réparations coûtent 4% d'une voiture (54 milliards en 2015), la réalité augmentée pourrait réduire ces coûts durant tout le cycle de vie du produit.

Cet article est basé sur le projet EASER-R³²⁸, il illustre deux utilisations des modèles pour le Mapping: CAO et image. Le premier nécessite un modèle CAO (plan informatique) pour identifier la position de l'objet à maintenir, le deuxième entraîne l'application par une série de photos pour le reconnaître.

Les auteurs proposent comme exemple une application de maintenance de portable qu'ils vont tester sur des utilisateurs sans expertise.



Figure 31 Exemple d'application de maintenance d'un portable[27]

→ On remarque les flèches droite et gauche (rouges) pour le déplacement dans les phases de maintenance. Et le logo pellicule (en bas à gauche) pour l'accès à une vidéo d'aide

Les auteurs constatent que quand les utilisateurs ont un faible niveau de compétences, les bénéfices d'une application de réalité augmentée sont plus importants. Et ils pensent aux évolutions possibles vers une aide en ligne d'expert et l'adaptabilité de l'application en fonction du niveau de l'utilisateur.



²⁸ <http://www.easer3.eu>, mais ce projet semble avoir pris fin en 2016, car il n'y a plus d'actualité sur le site depuis lors. Aucun mail envoyé n'a reçu de réponse.

10.2.8. Éléments d'interface entre l'utilisateur et l'application

Source : Augmented Reality for Maintenance

De G. Paravati en 2017 [28].

- Cet article décrit sans la nommer la 4^{ème} révolution industrielle. Après l'introduction à partir de 1960 de l'informatique dans les usines (la 3^{ème} révolution), la 4^{ème} est caractérisée par la numérisation de l'usine, c'est-à-dire l'intégration de réseaux virtuels servant à contrôler des objets physiques.

Les appareils produits étant de plus en plus complexes tout en alliant software et hardware, leur maintenance demande une bonne connaissance des deux domaines. La RA pourrait aider les techniciens en donnant une représentation intuitive et en temps réel pour la maintenance corrective et prédictive.

Il décrit des opérations de maintenance à l'aide d'un smartphone ou d'une tablette en milieu industriel.

- Contrairement aux autres articles qui prônent un HMD.

Ci-dessous, un exemple d'utilisation pour le remplacement d'un toner d'imprimante

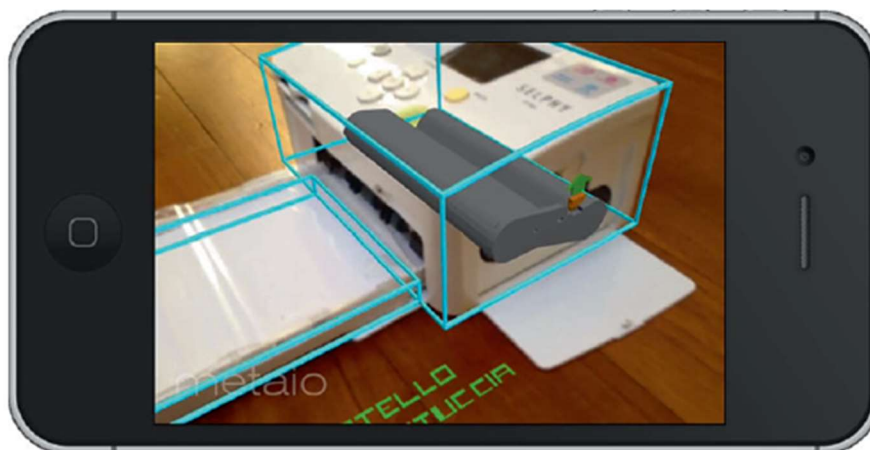


Figure 32 RA pour le changement d'un toner d'imprimante

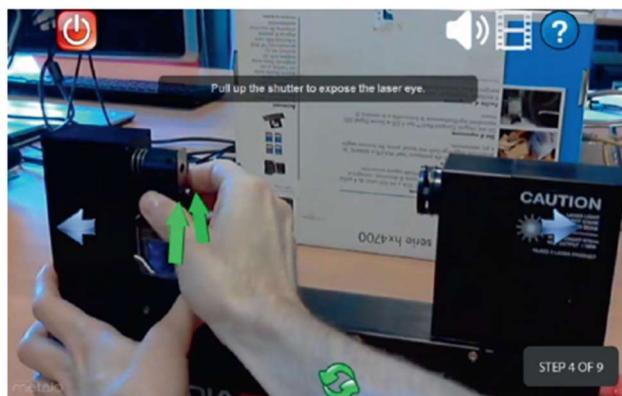


Figure 33 Écrans de RA pour le nettoyage de lentille dans un outil de mesure basé sur le laser

- Exemple d'une autre utilisation pour le nettoyage des lentilles dans un appareil de mesure utilisant le laser. On remarque ici les flèches de mouvement à effectuer par l'opérateur (en vert) et l'état d'avancement dans la tâche de maintenance (avance et recul avec les flèches bleues).

Les images viennent d'un projet européen "Easer3", et concernent des applications de maintenance en réalité augmentée développées dans ce cadre.

Il parle aussi de "ARtoolkit"²⁹, en tant que plateforme de développement.

- ➔ Mais la dernière activité sur le projet "GitHub" date de 2017 (voir chapitre 11.4 Évaluation des logiciels nécessaires pour établir une application de réalité augmentée).
- ➔ M Paravati envisage aussi la possibilité de projection rétinienne de la réalité augmentée. Toutefois, une recherche approfondie sur cette question donne de maigres résultats à l'instar de cette référence sur le site de "Silver Économie"[29] qui parle de "Lightvision"[30], plus particulièrement à destination des personnes âgées atteintes de dégénérescence maculaire. L'actualité du site "Lightvision" n'affiche plus rien après 2017. Autre exemple vu sur Internet, l'annonce par "Intel" d'un projet de lunettes à projection rétinienne en février 2018 [31] mais qui n'a pas fait long feu, car abandonnée deux mois plus tard. Il semble que cette idée de projection soit dans l'impasse, à tout le moins le sujet est très peu documenté sur Internet (confidentialité du développement et/ou des enjeux économiques?).

Par contre M Paravati propose plusieurs types de reconnaissances pour l'interface d'entrée d'une application de RA:

- La reconnaissance vocale;
 - La reconnaissance des mouvements de l'œil;
 - La reconnaissance gestuelle.
-
- ➔ La reconnaissance des mouvements de l'œil pourrait être utilisée grâce à l'application "Umoove"³⁰, qui permet de suivre les mouvements des yeux et du visage, et ce uniquement de manière logicielle [32] (voir vidéo³¹).
 - ➔ La reconnaissance gestuelle est en concurrence avec les opérations de la main effectuant les travaux de maintenance, mais il serait intéressant d'utiliser les mains pour activer les boutons d'action de l'application.
 - ➔ La reconnaissance vocale pour exécuter des actions de l'application nous semble donc être une bonne piste pour notre objectif.

29  <https://github.com/artoolkit>

30  <http://www.umoove.me/>

31  <https://www.youtube.com/watch?v=imeXVbPWn8E>

10.2.9. Contrôle d'application par la voix

Source : Voice controller mobile Android application.

De P. Siagian¹, S. Hutauruk en 2018 [33].

- ➔ La reconnaissance vocale a été suggérée par M Parvati dans l'article précédent;; cet article a été sélectionné pour voir les possibilités d'utiliser cette reconnaissance comme système d'entrée pour notre application.

Les smartphones deviennent une part importante de notre vie, le besoin d'une interface vocale avec eux s'accroît, et, dans une application RA elle pourrait aider les utilisateurs à se focaliser sur leur travail sans effort supplémentaire des yeux et des mains.

L'application présentée dans cet article consiste à entrainer la voix pour exécuter une commande.

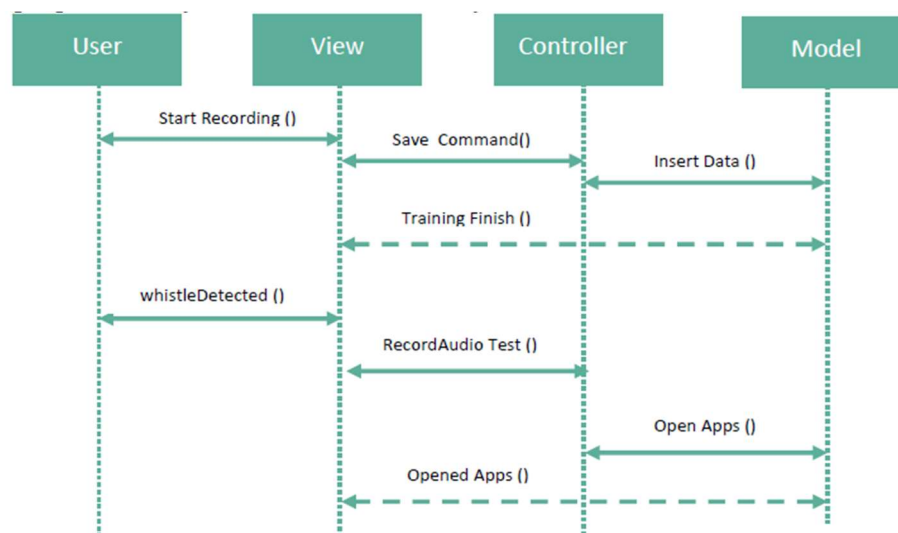


Figure 34 Diagramme de séquence d'utilisation de la reconnaissance vocale

Ce schéma montre l'apprentissage d'une série de commandes vocales dédiées à une application :

1. Phase d'entraînement: l'utilisateur enregistre le mot "avancer" et l'associe à une commande de l'application. Cette association est enregistrée dans le modèle;
2. Phase d'exécution: lorsque l'utilisateur prononce le mot "avancer", il est détecté, recherché dans le modèle, et la commande associée est exécutée.

Il est précisé qu'Android contient des fonctions de reconnaissance vocale intégrées.

- ➔ Ces fonctions pourraient être utilisées dans notre application. Que ce soit au niveau d'"Appel" avec son kit de développement pour "Siri" ("Sirikit" [34]) ou chez "Android" pour le "Google Voice Action" [35]. Il semble facile de créer une interface incluant les commandes vocales.

10.2.10. Conception d'une IHM pour la AR

Source: A quick guide to designing for augmented reality on mobile

De B. Mahmood en 2018[36]

➔ Cet article est un guide de recommandations pour le design réalisé dans la phase d'Authoring (forme, couleurs, emplacements...) des ajouts de RA. Les recommandations citées dans l'article, en lien avec notre objectif, sont les suivantes:

- **Story Telling:** il faut être capable de décrire une suite de tâches et d'événements qui conduiront au but de l'application de réalité augmentée. Plus cette description sera détaillée plus l'implémentation de l'application sera facile, et ses tests seront aisés;
- **Alerts and rewards:** s'il faut alerter l'utilisateur quand il fait des erreurs, il ne faut pas oublier de le récompenser (feux d'artifice, "ok"...);
- **Off screen indicator:** il est nécessaire de prévoir des moyens (flèche, boussole) pour signaler que des objets sont hors du cadre de la réalité augmentée;
- **Interacting with content:** l'imprécision du toucher de l'utilisateur sur un écran peut amener une différence entre ce qu'il veut faire et ce qu'il fait;
 - **Snapping:** création et placement des objets de manière précise à l'aide d'une fonction d'attraction magnétique ou de repérage physique qui tient compte de la direction et de la distance. Il s'agit de s'accrocher à un objet, un environnement, un guide;



Figure 35 Exemple de Snaping

- **Guides:** il faut prévoir des guides, penser à visualiser des ombres, des cages pour montrer le potentiel d'un objet.
 - Une cage 2D ou 3D fait référence au volume, à l'échelle et à la forme;
 - Les ombres représentent la proximité ou la distance;
 - Les lignes ou repères représentent l'alignement et la proximité;
 - Un indicateur visuel de mouvement, de rotation ou d'échelle est utile lorsqu'un utilisateur ne peut effectuer qu'une seule action.

- **Définir l'objectif principal de l'expérience utilisateur:** dans la réalité augmentée, il y a superposition des données sur un flux de caméra en direct. Nous n'avons aucun contrôle sur ce que montrera la caméra et devons concevoir l'application en conséquence. Il est judicieux de pré visualiser et de tester l'interface sur une variété d'images d'arrière-plan et de vidéos à mesure que la conception évolue;



Figure 36 Différents plans arrière pour une application RA

- **Conception:** les concepteurs doivent créer des éléments indépendants de leur environnement et travailler sur toutes les teintes et tous les niveaux de contraste.

10.2.10.1. Couleur

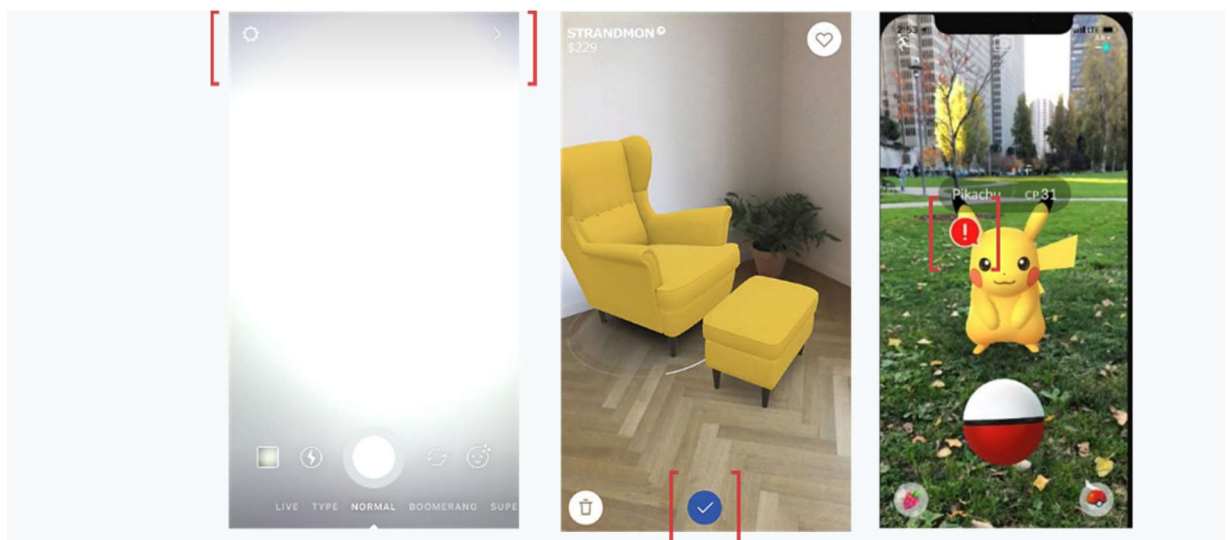


Figure 37 En-têtes de dégradé sur Instagram, couleur de marque IKEA comme couleur d'accent, couleur d'alerte rouge Pokemon GO

- Le blanc est la couleur la plus courante pour le texte, les icônes et les guides;
- Certaines applications comportent des vignettes ou des dégradés supplémentaires dans l'en-tête et le pied de page pour rendre les éléments fixes plus lisibles;
- Les couleurs des marques commerciales sont utilisées avec parcimonie ou pas du tout lorsque l'on est en vue caméra;
- Des couleurs système autres que les couleurs de la marque peuvent être utilisées pour faire référence à des erreurs, des avertissements ou des états terminés. Exemple: avertissement rouge lorsque l'on s'approche trop près;
- Les couleurs opaques sont généralement réservées aux boutons d'appel ou à des actions ou à des fonctionnalités telles que des déclencheurs qui peuvent être masqués par la main de l'utilisateur.

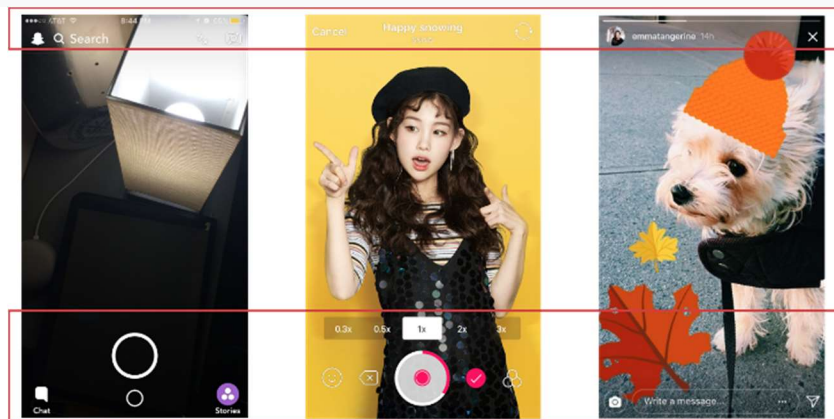


Figure 38 Couleur RA des menus

10.2.10.2. Position

- Les éléments fixes sont généralement situés en haut et/ou en bas de l'écran. Cela permet à l'utilisateur de se concentrer sur le centre de la caméra et de la composition;
- Les invites et les éléments qui ne sont pas centrés sur le contenu restent proches du bas. Par exemple les carrousels³² et options supplémentaires;

10.2.10.3. Texte

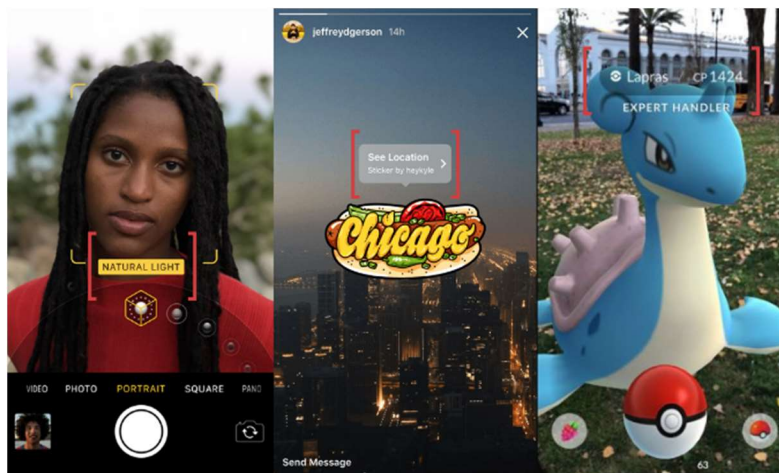


Figure 39 iOS portrait mode, Instagram location sticker, Pokémon Go stats

- Le texte est généralement traité comme une légende ou une étiquette et en sans-sérif, car il est plus facile à lire;
- Le texte est le plus souvent en blanc ou jaune sauf sur une couleur de fond;
- Le texte a généralement un conteneur opaque ou semi-opaque pour améliorer la lisibilité;
- Les textes sans conteneur sont traités avec une ombre douce et/ou un trait subtil.

³² Élément d'IHM consistant à afficher une liste d'éléments défilant, souvent de manière circulaire (3D) à l'image du "Flip 3D" dans "Windows Vista" et "Windows 7" (touche Win+Tab), ou du célèbre "Cover Flow" pour l'affichage des albums dans iTunes (Source: Wikipédia).

10.2.10.4. Icônes

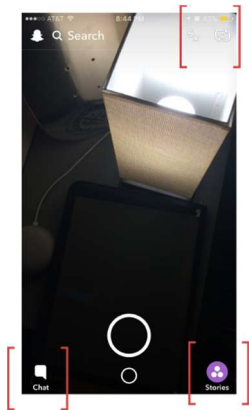


Figure 40 Icônes snapchat

Les icônes "Snapchat" sont pleines et aussi dans un conteneur opaque.

- Les traitements d'icônes varient entre détaillé, rempli et souligné;
- Les icônes détaillées ont souvent des conteneurs pour les distinguer du flux de la caméra en arrière-plan;
- Les icônes sont utilisées avec parcimonie, tout comme le texte;
- Les icônes ont souvent des contours ou des ombres pour les aider à se démarquer.

10.2.10.5. Mode de fusion

Dans un calque, le mode de fusion est un pourcentage de transparence par rapport au fond dans l'insertion d'un élément.

- En s'inspirant des jeux vidéo, les concepteurs peuvent aller au-delà d'une interface utilisateur opaque et transparente et envisager d'ajouter des modes de fusion à leurs éléments graphiques;
- Cette méthode permettra à l'utilisateur de toujours voir des parties de l'arrière-plan sans gêner complètement la vue. Les modes de fusion peuvent également réduire le poids visuel d'un élément fixe;

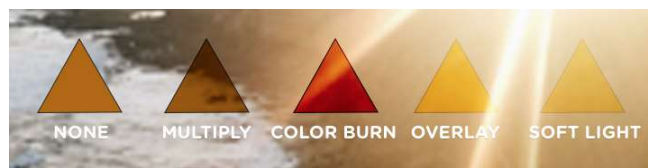


Figure 41 Transparence élément RA

10.2.11. Adaptation d'une application de AR à son utilisateur

Source: A practical Augmented Reality-assisted Maintenance System framework for adaptive user support (ARMS).

De C. Siewa, S. Onga, A. Neea en 2019 [37]

L'apport de la réalité augmentée pour le remplacement du manuel papier est certain, mais l'interface reste passive et limite ses effets.

Pour catalyser l'adoption de la réalité augmentée, il faut rendre l'interface plus réactive et l'auteur propose la définition d'ARMS pour Augmented Reality-assisted Maintenance System, le terme important étant "assisted" (assisté).

Par exemple, on peut ajouter un module haptique permettant de suivre les mouvements du poignet de l'utilisateur; ce faisant l'application constate que l'opérateur est au bon endroit ou non, et ce en fonction de la phase de maintenance réalisée. Le module peut l'avertir ou le féliciter en conséquence.

Le suivi de l'utilisateur (temps par phase, temps total, etc.) permettrait de donner des informations de performance à l'utilisateur. Par exemple le temps passé dans une phase, peut, en fonction d'un seuil, être :

- insuffisant: on pourrait suggérer de diminuer le niveau d'aide;
- suffisant: rien à changer;
- trop long: on pourrait suggérer d'augmenter le niveau d'aide.

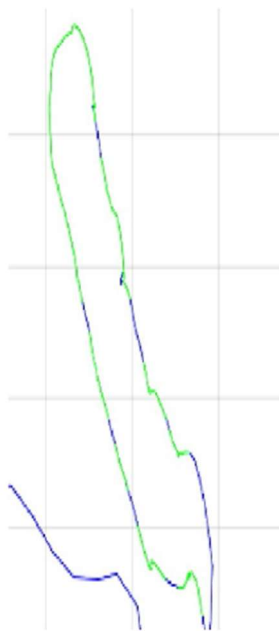


Figure 42 Graphique de déplacement AR

L'application enregistre aussi un graphique spaghetti des mouvements du poignet, la courbe est verte si la position du poignet est correcte, sinon elle est bleue. De nombreux changements de couleur pourraient indiquer de nombreuses erreurs de l'utilisateur et lui être signalées, car un utilisateur parfait aurait une courbe entièrement verte.

On peut aussi suivre aussi le regard de l'utilisateur pour savoir où se porte son attention et si cette position est correcte vis-à-vis de l'étape à réaliser.

Une application devrait être capable de s'adapter au niveau de l'utilisateur (de néophyte à expert) et de changer le niveau d'aide visuelle en fonction de celui-ci. Ce changement pourrait être :

- **Explicite**: le changement est demandé par l'utilisateur;
- **Implicite**: par la détection de temps trop longs, de mauvaises positions de la main, de mauvaises positions du regard, ou à l'inverse si ces items sont bons, le système propose à l'utilisateur d'adapter le niveau d'aide.

Plusieurs types d'augmentation d'éléments d'Authoring améliorant la réactivité sont possibles :

- **Visuelle** : la partie la plus importante de l'augmentation. Cela peut être des pointeurs des flèches, mais aussi des portions de texte, mais celle-ci peuvent vite être trop nombreuses à l'écran, il ne faut donc ne pas hésiter à se tourner vers les autres formes d'augmentation;
- **Audio** : l'audio peut expliquer les détails d'une phase sans encombrer la charge visuelle;
- **Haptique** : un bracelet vibrant peut être utilisé pour par exemple signaler la mauvaise position de la main de l'utilisateur.

Les caractéristiques d'une étape de maintenance :

- **Caractéristique physique**: le modèle CAO de l'objet, de l'outil, avec sa position et sa taille;
- **Information de position haptique**: la position du poignet pour la tâche;
- **Information textuelle**: description en texte de l'étape;
- **Information auxiliaire**: l'audio apporte des précisions sur l'étape.

L'adaptabilité de l'application par rapport à l'utilisateur implique aussi de stocker dans un profil les différentes informations collectées, pour les utiliser et lorsqu'une tâche de maintenance est exécutée par le même utilisateur.

10.2.12. Que retenir?

- Possibilité de configurer des enregistreurs TV, hifi, home cinéma;
- Vats: modélisation des tâches de maintenance en un arbre hiérarchisé;
- Utilisation des casques type "Hololens";
- Vue AroundPlot (vue Fish-eyes) pour la navigation;
- Flèches 2D dynamiques;
- Adaptabilité de l'interface au niveau de son utilisateur et de son environnement;
- Contrôle d'application : vocal-gestuel-oculaire-haptique;
- Contrôle vocal intégré dans les smartphones;
- ARMS: analyse des mouvements de la main, de l'œil et modification de l'aide (explicite, implicite).

10.3. Algorithmes

10.3.1. Formalisation des phases AR: Authoring – Mapping – Tracking

Source: Providing Guidance for Maintenance Operations Using Automatic Marker less Augmented Reality System.

De H. Ivarez, I. Aguinaga, D. Borro en 2013 [38].

Cet article présente seulement un algorithme pour monter un système de réalité augmentée de maintenance.

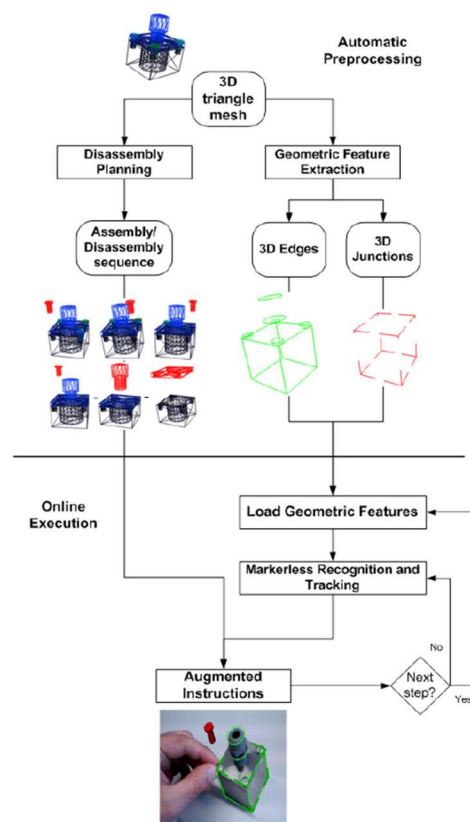


Figure 43 Algorithme AR

Phase d'Authoring
C'est la phase de préparation :

- Lister les opérations de maintenance à effectuer;
- Créer les objets à insérer (outil, flèche);
- Extraire les contours, faces et jonctions des modèles CAO (dessin 3D) permettant de reconnaître l'objet réel

Phase de Mapping
Numériser l'espace de travail et ajout des éléments virtuels. Ici le Mapping se fait sans marqueurs, mais bien sur base des modèles CAO précédemment créés.

Phase de Tracking
Modifier le plan obtenu en fonction des mouvements de la camera

➔ L'introduction de la détection d'"edge" (les contours) et de "junction" (les intersections) pour la reconnaissance d'un objet apporte un premier éclairage sur la manière de reconnaître l'appareil visé par notre maintenance, cet algorithme donne une vue d'ensemble d'une application de RA.

10.3.2. Introduction à SLAM et aux phases de Mapping et Tracking

Source: Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces.

De G. Klein, D. Murray en 2007 [39].

Cet article introduit plusieurs notions fondamentales d'une application de réalité augmentée "SLAM" (Simultaneous Localization And Mapping) est un algorithme développé en robotique, gérant le :

- **Mapping**: modélisation de l'espace vu par la caméra;
- **Tracking**: lorsque la caméra se déplace, il faut modifier les données de l'espace en fonction du déplacement, et donc modifier le Mapping.

Les hypothèses pour le Mapping sont que l'environnement soit une scène statique (non déformable) et petite (un utilisateur reste à la même place), ce qui facilite également le Tracking. En vue d'une optimisation en termes de performances, les auteurs proposent de séparer le Mapping du Tracking en deux processus distincts et concurrents, ce qui serait une évolution de "SLAM".

➔ Mais pourquoi ne pas intégrer dans le Tracking les senseurs (dans notre GSM les senseurs gyroscopiques ou d'accélération) ? C'est sans doute dû à l'ancienneté de l'article, car dans le chapitre 11.3 Algorithme d'aide pour la réalité augmentée nous introduirons "Vislam" (Visual Inertial Simultaneous Localization and Mapping) qui, justement, utilise ces senseurs.

10.3.3. Que retenir

- "SLAM" : optimisation en deux process
- Algorithme d'une application RA

10.4. Perspectives

D'autres articles parlent de perspectives, mais c'est l'article de "Harvard Business Review"³³ qui condense la majeure partie des perspectives techniques et financières des applications de réalité augmentée.

10.4.1. Panorama de la réalité augmentée dans les entreprises

Source : Pourquoi les entreprises ont besoin d'une stratégie de réalité augmentée ?

De H. Heppellmann, J. Porter en 2017 [1].

L'article prévoit qu'avec une perspective de 60 milliards USD de dépenses prévues en 2020, la réalité augmentée transformera notre manière d'apprendre, de décider et d'interagir avec le monde.

L'arrivée massive d'objets connectés va aussi influencer la réalité augmentée. On peut imaginer des panneaux de contrôle en RA, réduisant le coût en supprimant les interfaces physiques.

➔ Néanmoins, on pourrait illustrer cet article, par les cubes Wifi de "Tenda" (Figure 44) qui ne comportent aucun bouton, juste une LED bleue, orange ou rouge où toute la configuration se fait par une application 2D smartphone, mais pourrait être réalisée en 3D.

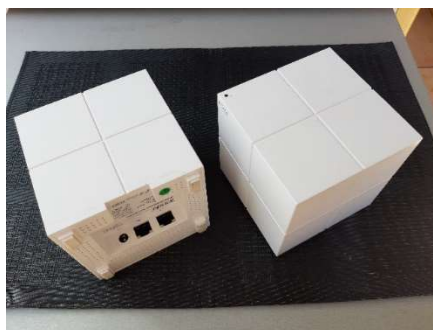


Figure 44 Tenda MW6 wifi mesh³⁴

➔ Un autre exemple serait de présenter des commandes complexes (comme un four avec ses multiples commandes) dans une interface de réalité augmentée, celle-ci multipliant les possibilités d'interagir.

Les auteurs signalent enfin que les visiocasques qui faciliteront ces opérations en libérant les mains de l'opérateur pourraient avoir une importance grandissante.

➔ L'abandon de "Google Glass" pour le grand public, et le prix des "Hololens" de "Microsoft" semblent contredire cette prédiction.

³³ La Harvard Business Review est une revue américaine sur le monde de l'entreprise, éditée mensuellement depuis 1922 par Harvard Business Publishing, maison d'édition appartenant à la Harvard Business School, école de management de l'université Harvard (Wikipédia)



³⁴ <https://www.tendacn.com/fr/product/nova%20mw6.htm>

Deux notions importantes sont définies ³⁵:

- La charge cognitive : la capacité d'absorption et de traitement de l'information est limitée par nos aptitudes mentales à réaliser des tâches simultanées. La charge cognitive augmentera si l'effort mental nécessaire au traitement d'un type d'information donné augmente. Lire des instructions consomme par exemple plus de charge cognitive que de les écouter.
- Écart cognitif : il représente la différence entre la forme dans laquelle l'information est présentée et le contexte dans lequel elle est utilisée. Combler cet écart ajoute une charge cognitive. Par exemple, l'utilisation d'un GPS en voiture, que ce soit sur le smartphone ou un écran embarqué, affiche une représentation 2D confrontée à la route en 3D, l'écart cognitif est donc important et implique un supplément de charge cognitive.

La réalité augmentée diminue la dépendance aux infos 2D et donc diminue la charge cognitive.

Chez Volkswagen, les tests de concordance entre prototype et modèle 2D ont été rendus 10 fois plus rapides par la réalité augmentée et celle-ci a permis, chez Xerox, de mettre en lien les experts et le technicien avec une augmentation de la production de 67%.

➔ Nous pouvons donc penser qu'au niveau domestique les gains en temps et en efficacité pourraient être comparables.

J. Porter, un des deux auteurs, suggère que le set d'instructions peut être différent suivant les utilisateurs, en s'adaptant à leur niveau de compétences.

➔ Comme dans l'article sur l'"ARMS" (voir chapitre 10.2.11 Adaptation d'une application de AR à son utilisateur).

10.4.2. Que retenir?

- Charge cognitive et écart cognitif;
- Application adaptative aux utilisateurs;
- Panneaux de commande en RA;
- Perspective financière.

³⁵ Ces éléments sont construits à partir de la Psychologie ergonomique cognitive, mais l'auteur ne cite pas ses sources.

11. Synthèse des données collectées

C'est donc sur la base de ces catégories établies au chapitre 9 que la synthèse est établie. Elle est enrichie de données historiques pour mieux appréhender l'évolution future, et de recherches complémentaires en vue de compléter la réponse à la question :

Q : *Quels sont les concepts à utiliser pour développer une application de réalité augmentée dans des opérations de maintenance domestique ?*

11.1. Phases de la réalité augmentée

Suite à la lecture des différents articles, on peut maintenant affirmer qu'une application de réalité augmentée se découpe actuellement et généralement en trois phases:

- d'abord la création des objets à insérer et insertions dans la réalité (Authoring);
- puis la création d'une carte de l'environnement (Mapping);
- ensuite, la modification de cette carte en suivant les mouvements de la caméra (Tracking).

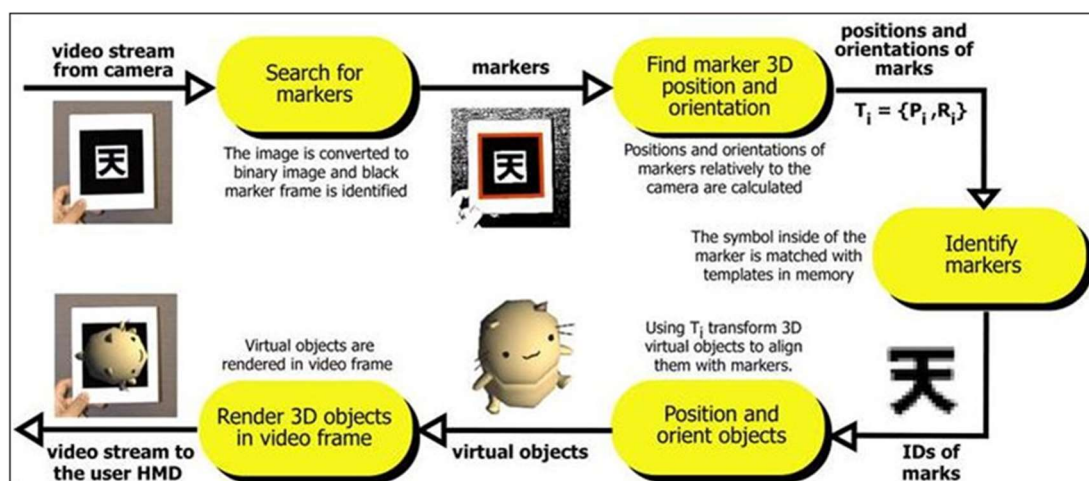


Figure 45 AgroTIC (2013, 5 décembre) schéma d'une application de réalité augmentée

11.1.1. Authoring

Authoring ou comment insérer des informations, des objets virtuels (texte, image, données, outil en 3D, vidéo) à chaque étape de l'application. C'est sans doute la première phase à mettre en œuvre.

Ensuite l'application les placera dans le monde réel et les ancrera, pour qu'ils restent au même endroit si la caméra change de place. De nombreux articles mentionnent "Unity3D" qui est un leader des plateformes pour la création de jeux comme éditeur d'Authoring. Et de plus, "Vuforia" s'interface avec "Unity3D".

Il faut d'abord créer les différents scénarios qui couvrent les différentes étapes de la réparation. Chaque étape peut ancrer de nouvelles indications ou de nouveaux

outils dans la réalité, une application pourrait être développée en associant des modèles d'outils, des indications, dans un arbre de décision qui guidera l'utilisateur.

11.1.2. Mapping

L'initialisation de l'environnement de réalité augmentée commence par l'analyse des images acquises par la caméra, puis l'identification des objets reconnus par l'application.

La première approche se base sur des marqueurs fiduciaux (à "coller" sur l'objet à reconnaître); cette méthode est la plus fiable, elle donne un système facile à entrainer si ces marqueurs sont faciles à distinguer.

Les logos de marque pourraient être utilisés en tant que marqueurs fiduciaux pour améliorer le Mapping, mais comme ils sont semblables sur toute la gamme, il faudrait soit les rendre différents suivant le modèle, soit demander à l'utilisateur de choisir le modèle de l'appareil à réparer et d'identifier le logo comme marqueur de position.

Ou, pourquoi pas, intégrer le numéro de série dans le marqueur et ainsi identifier de manière unique le dispositif, ce qui permettrait de stocker l'historique des maintenances effectuées et de le mettre en relation avec le profil de l'utilisateur. Cela implique le stockage de données personnelles, qui seront soumises au RGPD³⁶.

Une autre option est d'utiliser des marqueurs contenant le logo et un champ texte pour les modèles ce qui élimine les problèmes de dictionnaires soulevés par S. Garrido-Jurado [16], mais entérine plutôt la solution de H. Martínez [40] qui inclut une ligne de caractères:

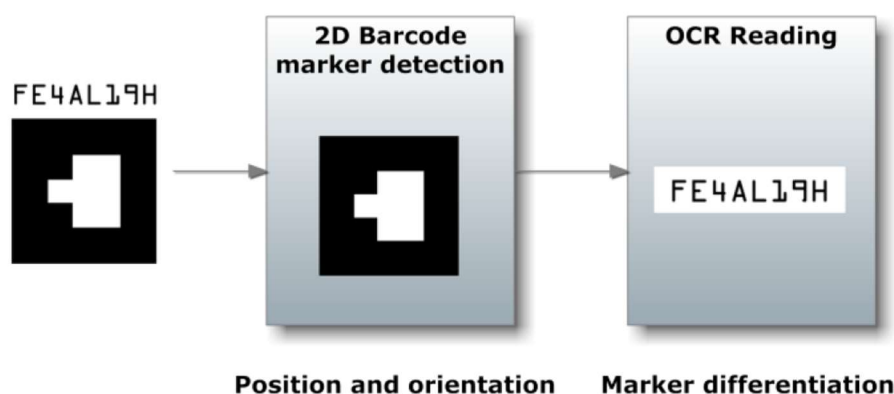


Figure 46 Marqueur et OCR

Cela donne une plus grande lisibilité, mais cela reste austère si on doit appliquer ce marqueur de manière visible sur des appareils de la cuisine.

³⁶ Règlement général sur la protection des données

Le dernier venu est le "VuMarks", imaginé par "Vuforia" et déjà utilisé pour le "Lego Nexa Knight"³⁷, il peut mélanger logo et information de façon harmonieuse. On remarque que les couleurs sont utilisées avec un effet positif sur la segmentation chromatique [16] ce qui permet une détection plus aisée.



Figure 47 Vumarks [41]

Deux autres possibilités sont offertes :

- Les images;
- Les modèles CAO.

Dans le cas des images on collecte une série d'images (nommées images d'entraînement) de l'objet réel venant de différents points d'observation. Ces images sont traitées pour identifier et extraire des descripteurs, et lors de l'analyse de la caméra on recherche ceux-ci.

Quand un nombre suffisant de descripteurs correspond aux images, on a trouvé les positions de l'objet et donc ses 6D (emplacement 3D et orientation 3D), on peut donc passer au Tracking. Malheureusement cette méthode dépend beaucoup des conditions environnementales (éclairage, réfléchissement, ombre...) [14]. L'application "HBR" en annexe 17.2 donne un exemple de cette détection, l'image imprimée est détectée par l'application, puis fixée dans l'espace pour l'intégration des objets 3D.

La deuxième possibilité est d'utiliser les modèles CAO de l'objet. Il est alors possible de simuler plusieurs environnements. Jon Zubizarreta donne un exemple de ce genre d'analyse [15].

En déplaçant la caméra virtuelle autour d'une sphère, on obtient des modèles de l'objet sous tous les angles et l'on peut plus facilement l'identifier dans la réalité. La détection de ces modèles permet d'en déduire les éléments qui permettront de le reconnaître et de fixer sa position et sa taille (6D).



37

<https://vimeo.com/157704998>

11.1.3. Tracking

Le flot des images venant de la caméra doit être traité pour détecter les mouvements de la caméra et modifier le Mapping en fonction d'eux tout en gardant l'ancrage des objets virtuels à leur place correcte.

Le Tracking peut être facilité par l'utilisation des capteurs de mouvements dont sont pourvus les smartphones. Parmi ceux-ci le GPS, le gyroscope et l'accéléromètre comme le souligne B. Delail.

Cette phase implique des algorithmes qui sont évoqués dans ces articles, mais ils donnent peu de détails sur leur implémentation.

Les plus importants dérivent de "SLAM" et sont intégrés dans beaucoup de logiciels, entre autres "Vuforia".

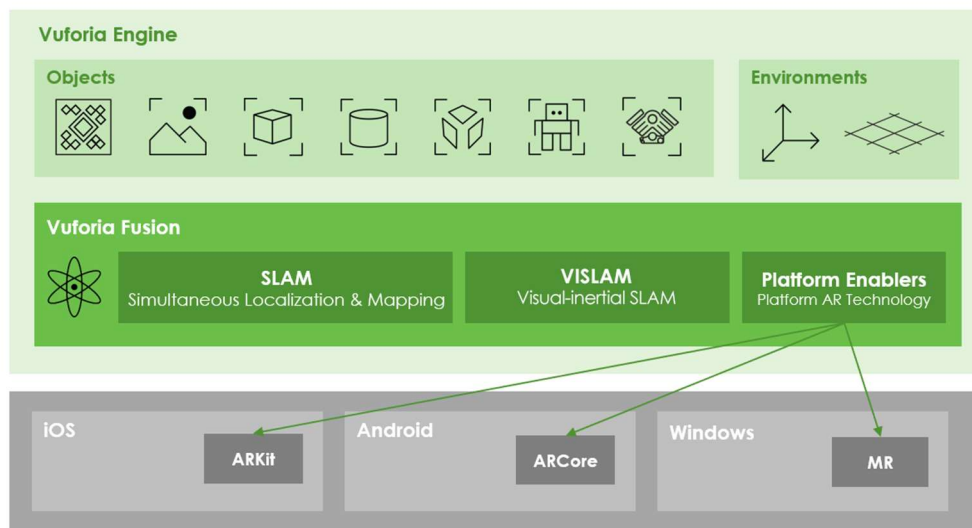


Figure 48 : Modèle de fusion de Vuforia [42]

Dans ce diagramme "SLAM" ou "VISLAM" (Visual-Inertial Simultaneous Localization and Mapping - intégration des senseurs inertiels dans le Tracking) sont utilisés quand le module spécifique à la plateforme n'est pas présent ("ARKit", "ARCore"), l'application peut donc tourner sans leur présence.

11.2. Aspects liés aux questions D'IHM

Selon J. Zubizarreta [15] et par la suite C.Y. Siew [37], l'application doit adapter son niveau d'aide en fonction de la connaissance de l'utilisateur. Et même proposer de modifier son niveau si des erreurs ou des temps excessifs de réalisation sont constatés.

Pour éviter l'encombrement de l'écran de l'application, il faut chercher d'autres moyens de communication. Les annotations vocales apparaissent comme une bonne idée, ou encore un bracelet haptique qui ouvre un nouveau canal de communication (par exemple en vibrant lors d'erreurs).

Les mains de l'utilisateur étant requises pour la manipulation du smartphone et des outils éventuels nécessaires à la réparation, c'est tout naturellement que l'on doit s'orienter vers un contrôle vocal de l'application, car on doit limiter le nombre d'éléments présents à l'écran.

La navigation entre les étapes de la réparation ne nécessite pas beaucoup de commandes différentes (avancer, reculer, arrêter, passer) et Android possède des fonctions intégrées de reconnaissance vocale. Les paramètres de cette application seraient une base de données qui contiendrait les différents mots reconnus [6] associés aux commandes de l'application. Il apparaît qu'"Unity3D" supporte le "Voice Control"³⁸.

Les premiers éléments d'interface apparaissent chez S. Henderson [25] avec des éléments tels que les flèches 3D et 2D pour les informations de direction ou de position, ainsi que des modèles 3D des outils à exploiter. L'idée de Yuan d'utiliser par exemple des flèches rouges qui indiquent les objets hors écran semble pertinente.

La vision en Fish-eyes pourrait être utilisée si la scène de maintenance est plus grande que la FOV.

Les "Vats" semblent être une bonne solution pour la généralisation des procédures de maintenance, pouvant être modifiés et adaptés assez facilement; on peut même utiliser le "formalisme en boîte" de R. Palmarini. Mais la création d'une application gérant la création des tâches de maintenance semble être un impératif si l'on généralise le but de notre application. De plus il faut envisager de pouvoir les modifier assez facilement par exemple lors d'une mise à jour ou suite à une intervention d'un expert sur un cas particulier.

Mais le principal sera l'adaptabilité afin de modifier (implicitement) le niveau d'aide en fonction des données recueillies venant de l'utilisateur. L'analyse des mouvements de sa main et de son œil ("Umooove") donnera des informations de performances permettant les modifications du niveau d'aide. De plus cette analyse de la main pourrait conduire à l'activation de contrôles (boutons et autres) par des gestes dans l'environnement réel³⁹ pour réduire l'écart cognitif.

11.3. Algorithme d'aide pour la réalité augmentée

"SLAM" (Simultaneous Localisation and Mapping) a été créé pour la robotique. Un robot mobile a besoin d'analyser son environnement pour se repérer. "SLAM" se décompose en deux phases: l'acquisition de l'environnement (Mapping) et les modifications de celui-ci (Tracking) induites par les mouvements du robot.

Des travaux plus récents étendent "SLAM" avec "GSLAM" (General Simultaneous Localisation and Mapping Framework) qui prennent en charge les



³⁸ <https://www.youtube.com/watch?v=KNZStDIJLus> est une vidéo qui montre la commande vocale appliquée à un élément 3D dans "Unity3D"

³⁹ Remarque qui a été faite par un utilisateur de l'app HBR : "pourquoi ne pas pouvoir actionner un des trois boutons avec la main sans toucher l'écran".

différents capteurs, notamment une caméra monoculaire, des capteurs RGB-D ⁴⁰ou tout autre type d'entrée [7]. Il est noté que "GSLAM" est disponible en "C++", ce qui serait compatible avec "ARCore".

Suite à des recherches sur "SLAM" et "Vuforia", une autre alternative est apparue avec "Vislam" (Visual-Inertial Simultaneous Localization and Mapping) qui tient compte des IMU et qui est une extension de "SLAM". L'article de M. Quan donne une compréhension détaillée de cet algorithme [43].

Une autre version de "SLAM" est ORB-SLAM2, pour intégrer les senseurs dans le Tracking, mais le projet "Git Hub", n'a plus de mise à jour depuis 2017⁴¹.

Une autre piste est d'utiliser des réseaux neuronaux pour estimer les 6D [44], mais des doutes subsistent en terme de performance quant à l'utilisation de tels réseaux dans un smartphone.

L'utilisation de ces algorithmes, sans l'aide d'une application les intégrant est sans doute intéressante au niveau de la recherche, mais semble difficile à mettre en œuvre et demanderait beaucoup de temps de travail pour le développement de notre application.

11.4. Évaluation des logiciels nécessaires pour établir une application de réalité augmentée

Les premières applications de RA sont du fait de "Google Andar" [18] qui a débuté en 2010 puis s'est arrêté en 2014 au profit de "Tango", mais qui nécessitait une partie matérielle et logicielle (comme le "Lenovo PHAB 2 Pro" ou encore le "Google Pixel" et le "Samsung Galaxy S8"). Cette ambition n'a pas fait long feu, car les ajouts matériels nécessaires ne se sont jamais généralisés. Et donc c'est en mars 2018 qu'"ARCore" est sorti, plateforme de création d'expériences en réalité augmentée de "Google", en essayant de faire de l'ombre à "ARKit" (voir plus loin).

"ARcore" n'est pas compatible avec tous les GSM (voir annexe 11.1), toutefois, cette liste s'agrandit régulièrement et semble se généraliser du moins pour les GSM récents. Et il y a déjà un portage d'"ARcore" vers "IOS"...

Du côté d'"Apple" le rachat des outils de de réalité augmentée de "Metaio" (2015) a donné le premier pas de "ARKit" en 2017 puis une version en 2 en 2018 et la version 3 en juin 2019 qui permet de placer des objets devant ou derrière une personne. C'est une plateforme uniquement logicielle destinée à générer des applications de réalité augmentée avec la limitation de n'être compatible qu'avec les "iPhone" et "iPad". Il semble probable que le portage vers "Android", connaissant l'orientation isolationniste de "Apple", ne soit jamais développé.

⁴⁰ Une caméra RGB-D est une caméra qui fournit simultanément une image couleur (Read-Green-Blue) et une carte de profondeur (Depth) caractérisant la distance des objets vus par rapport au plan focal.



⁴¹ https://github.com/raulmur/ORB_SLAM2

"Facebook" a aussi investi en réalité augmentée, à travers un studio d'Authoring ("Spark AR studio"). Mais il semble fortement orienté vers la modification de personnages en 3D (masque appliqué sur un visage et bougeant en phase avec les mouvements de celui-ci). Et par le rachat d'"Oculus"⁴² en 2014 (nommé depuis lors "Facebook reality lab."), "Facebook" investit aussi dans les casques de réalité virtuelle. La dernière mouture de ce casque ("RIFT S" [45]) comporterait aussi des caméras pour améliorer le Tracking ce qui pourrait conduire de la réalité virtuelle vers la réalité augmentée.

"Snapchat" a publié sa nouvelle fonctionnalité de RA à travers les "World Lenses". Les utilisateurs peuvent placer un masque sur une vidéo réelle (oreilles et langue de chien par exemple). Tous comme "Facebook", "World Lenses" utilise "SLAM".

"Vuforia" et "Wikitude" sont des plateformes de développement d'applications en réalité augmentée les plus citées par les articles. L'avantage de ces plateformes est de tirer parti de possibilités locales d'"ARKit" et d'"ARCore" sans devoir les développer sur chacune d'elles. "Vuforia" permet aussi d'utiliser "Unity3D" comme moteur de création 3D, et possède des fonctions cloud pour télécharger des objets et des fonctions (utilisé pour l'application "Ikea place"). "Vuforia" supporte aussi les HMD "HoloLens" de "Microsoft".

Une autre option est "AR-media Player" qui est une librairie aussi bien disponible sur "IOS" que sur "Android" [46]

"ARToolkit" [14] est une librairie open source développée par le Dr Hirokazu Kato, puis déposée sur "GIT hub" comme projet open source jusqu'en 2007 et une entreprise est créée pour le piloter, "ARToolworks". La compagnie "DAQRI" rachète le projet, et le redépose sur "GIT hub" tout en offrant une version 5.2 jusqu'en 2016, remplacée alors par une dernière version 5.3. B. Vaughan and P. Lamb, les anciens CEO et CTO de "ARToolworks" ont créé un fork "ARtoolkitX" supporté par "Realmax Inc", une compagnie chinoise de matériel pour réalité augmentée. Il est à remarquer qu'il existe un plugin "Unity" pour ce logiciel.

Une librairie "ArUco"⁴³ (fonctionnant avec "ARtoolkitX") permet aussi de générer des dictionnaires de marqueurs fiduciaux comme l'explique S. Garrido-Jurado [16] et permet aussi de résoudre les problèmes d'occlusion du virtuel sur le réel.

42  www.occulus.com

43  <https://www.uco.es/investiga/grupos/ava/node/26>

Il est toujours possible de développer une solution inter plateforme ("Android", "IOS", "Microsoft") sans passer par ces logiciels ("Vuforia", "Wikitude"...), mais cela semble être une charge trop importante de travail, au vu de la volatilité du marché (entre autres pour "ARcore" et "ARKit"). Cela demanderait un coût important de développement et de maintenance.

Un impératif de choix est que la solution soit multiplateforme ("Android"/"IOS"), mais aussi qu'il soit possible de porter l'application sur des modèles HHD comme le souligne F Lamberti [14]. Le tableau suivant est un extrait de [47] qui cite aussi "Xzing" et "Kudan AR Engine", non rencontrés dans les articles, mais qui pourraient faire l'objet d'une étude plus approfondie des softwares.

Tableau 2 Comparaison des Framework de développement

	ARtoolkit	Vuforia	AR media	Wikitude
Type	Logiciel libre	Gratuit + Commercial SDK en option	Gratuit + Commercial SDK en option	Gratuit + Commercial SDK en option
iOS	Oui	Oui	Oui	Oui
Android	Oui	Oui	Oui	Oui
marqueur	Oui Basic	Oui + Vumarks	Oui	Oui Advanced
Mobile avec Windows	Oui	Oui Vuforia est disponible pour Windows App Dev & aussi pour MS Hololens	Bientôt	Oui
PC/Mac/Linux	PC/Mac/Linux		Oui	
3D Object Tracking	Non	Oui seulement sur des boites, des cylindres et de petits objets 3D	AR media supporte PC/Mac et Linux	Oui
GPS		Oui	Oui	Oui
Senseurs IMU		Oui	Oui	Oui
Recherche visuelle		Oui	Oui	Oui Cloud Recognition & Offline (sur le dispositif)
Tracking Facial		Non	Non	Détection faciale
Fonction cloud	Non	Oui avec Vuforia Cloud	Non	Oui avec Wikitude Studio & Cloud Recognition
Unity (3D)	Oui	Oui	Oui	Oui 3D Tracking inclus

11.5. Quels sont les dispositifs matériels pouvant aider les applications de réalité augmentée

Si le but de ce travail est une application domestique, beaucoup d'articles parlent de HMD et l'on ne peut pas écarter que le développement de ce type de dispositif pour le marché grand public ne pourrait que croître.

Les avantages de ces HMD (ou casque de RA) sont la vision binoculaire, et aussi qu'ils possèdent des senseurs non présents dans les smartphones. Il est noté que l'on signale une fatigue visuelle sur des personnes utilisant ces dispositifs, malgré les avantages cognitifs qu'ils présentent.

Plusieurs HMD sont disponibles sur le marché, par exemple:

- "HoloLens" de chez "Microsoft" dont la version 2 est annoncée au prix de 3500\$;
- "Magic Leap One" (2295 \$) (www.magicleap.com);

Ces deux derniers sont nommés les plus performants par F. Carrière [48] qui fonde aussi de grands espoirs sur DAQRI, mais à un prix de 4995\$.

- "RealMax" de "Qian" (propriétaire d'"ARtoolkitX") annoncé à un prix inférieur à 1000€.

D'autres casques de réalité augmentée sont cotés sur ce comparatif⁴⁴, mais ce sont plus des casques de réalité virtuelle que de RA. Et ils demanderaient une étude de leurs spécifications techniques.

Tableau 3 Comparatif de casques RA

Produits	Prix	Score	FOV
MIRAGE STAR WARS JEDI CHALLENGES LENOVO	170€	3.6/5	60°
MOVERIO BT-300 EPSON	598€	3.4/5	23°
MOVERIO PRO BT-2000 EPSON	2564€	3.3/5	105°
AVIS VUZIX M100 VUZIK	854€	2.8/5	15°



⁴⁴ https://www.aniwaa.fr/comparatif/vr-ar/?filter_search&filter_price_minimum&filter_price_maximum&filter_category%5B0%5D=ar_glasses

Les senseurs haptiques pourraient être ajoutés à la panoplie des accessoires de nos smartphones, et permettre un nouveau canal de communication entre l'utilisateur et l'application, et pourquoi pas investir les montres connectées. Ces senseurs pourraient être équipés d'un marqueur pour permettre la localisation des mains et d'une fonction vibrante ajoutant un nouveau canal de communication (pour signaler les erreurs par exemple).

11.6. Perspectives d'évolution de la réalité augmentée domestique

La réalité augmentée ne peut qu'évoluer avec les performances de nos smartphones, permettant à des programmes plus lourds en termes de calcul (Deep Matching pour la 6D position) de rejoindre le temps réel.

L'arrivée des objets connectés va sans doute aussi faciliter le Mapping, dans la mesure où l'objet communique avec l'application, s'identifie, et peut même lui envoyer ses procédures de maintenance.

L'adoption dans les smartphones de doubles ou triples caméras pourrait amener l'adoption d'une caméra chromatique (RGB-D), et ainsi faciliter le Mapping ainsi que le problème d'occlusion.

Une stabilisation des différentes plateformes ("ARkit" et "ARcore") et les investissements de leurs constructeurs pourront faciliter l'intégration de nouvelles fonctionnalités.

On estime que les dépenses vont augmenter fortement dans les prochaines années, et qu'une partie de celles-ci iront à la recherche pour faire évoluer le monde de la réalité augmentée, que ce soit en termes de recherche pure, de développement ou encore de prix, afin de rendre par exemple les casques plus abordables pour les particuliers. Ces casques pourraient être un porte-smartphone comme ceux de "Veer" à 6 €⁴⁵, si la suite logicielle est aussi développée.



Figure 49 Veer pour smartphone



45

<https://www.aniwaa.fr/produit/vr-ar/veer-mini-vr-goggles/>

Quant à la maintenance, elle pourrait être prédictive au lieu d'être corrective, si le partage des informations entre les utilisateurs avait lieu comme dans l'application "Coyote". Ceci permettrait de détecter l'obsolescence programmée, ce qui ne serait pas du goût de tous les industriels mais serait inmanquablement détecté par les utilisateurs.

D'autres domaines tels que les extincteurs ou les défibrillateurs (la "sécurisation" humaine pourrait être considérée comme une forme de maintenance de première importance) devraient bénéficier d'un mode d'emploi en réalité augmentée. Cela pose la question du développement de matériel d'interaction "public" et de sa sécurisation. Ces avancées pourraient bénéficier à la maintenance industrielle.

Et de là à penser comme Michael E. Porter [1] que les panneaux de contrôle de nos appareils domestiques pourraient être complétés voire remplacés par une application de réalité augmentée, il n'y a qu'un pas. Car tout contrôle en réalité augmentée pourrait supprimer son pendant matériel et donc réduire le coût de l'appareil tout en permettant une mise à jour plus facile au niveau fonctionnel ou du mode d'emploi.

12. Discussion sur la réalisation d'une application de réalité augmentée appliquée à la maintenance domestique

Pour développer une application de réalité augmentée de maintenance domestique, les articles analysés donnent de bonnes pistes.

Au niveau software le candidat le plus prometteur est "Vuforia", pour ne développer qu'une fois pour toutes les plateformes ("IOS", Android") et même pour des HMD de type "Hololens". Et de plus ses "Vumarks" seraient une bonne idée de marqueur à intégrer sur l'appareil domestique. Cerise sur le gâteau, elle intègre "SLAM" et "VISLAM" pour le Tracking si les modules de réalité augmentée ("ARcore" et "ARkit") ne sont pas présents. Pour l'Authoring, l'utilisation de "Unity 3D" et son intégration avec "Vuforia" semble être le bon choix.

Cette application devrait :

- **Proposer un contrôle vocal:** les commandes avancer, reculer,... dans l'application se feront par des mots simples;
- **Utiliser la détection des mains et des yeux :** cela lui permettra de modifier son niveau d'aide en fonction de l'habilité de l'utilisateur;

- **Être adaptative**: permettre de changer de niveau d'aide en fonction de besoins de l'utilisateur que ce soit explicitement (demande) ou implicitement (les informations sur la position des mains donnant un indice de la compétence de l'utilisateur). En enregistrant ces données, elle pourra affiner son affordance⁴⁶;
- **Proposer l'aide d'un expert**: rendre possible l'appel à un expert, qui, en voyant la situation à travers la caméra du smartphone, pourrait aider en temps réel mieux qu'au téléphone voire même modifier à distance la procédure de maintenance;
- **Être multi dispositif**: s'adapter à plusieurs types de maintenance, en suivant les idées de "Vats" de L. Yuan [19], un peu plus formalisées dans V. Havard [10] avec ses boîtes (Entité, Entité externe, Actions, Maintenance, Opération). Le but étant de faire une plateforme utilisable par plusieurs marques et plusieurs modèles par la détection des marqueurs spécifiques à chaque dispositif;
- **Rendre l'interface intuitive** : elle devra suivre les principes d'IHM de B. Mahmood [36] au niveau couleur, environnement, etc., et les idées de flèches 2D et 3D pour indiquer les déplacements ou attirer l'attention sur une position dédiée à la tâche en cours seront utilisées. La technique Fish-eyes pourra être employée si le dispositif se prêtant à la maintenance est plus grand que le FOV.

⁴⁶ C'est un néologisme formé à partir du verbe anglais « to afford ». Plusieurs traductions sont possibles : « s'offrir quelque chose », « avoir les moyens de faire quelque chose », ou « fournir l'opportunité de / offrir » (un service, notamment). En quelque sorte, l'affordance offre à l'utilisateur les moyens de se servir d'un objet, y compris et si possible sans mode d'emploi [50].

Toutes ces recommandations permettront probablement d'avoir la possibilité, dans un futur proche, de voir se développer l'application de RA qui permettra de piloter le détartrage d'une machine à café.



Figure 50 Mock-up de l'application machine à café, aide vocale : "Allumez la machine"



Figure 51 Mock-up de l'application machine à café, aide vocale : "Remplir le bac avec la solution préparée"



Figure 52 Mock-up de l'application machine à café, aide vocale : "Tournez la manette vapeur vers l"

13. Conclusion

Dans ce mémoire nous avons essayé de trouver les éléments pour réaliser une application de réalité augmentée en vue d'une maintenance domestique, un seul article datant de 2011 aborde ce sujet, mais se base sur une technologie arrêtée ("Andar"). Pour trouver d'autres pistes il a fallu étendre la recherche à la maintenance industrielle, mais cela semble être un défi majeur suite aux nombreuses impasses rencontrées dans ces articles ("Easer3r", "Arvika", "Artesa", "Argitu"...).

Il n'en reste pas moins que les évolutions technologiques et la taille du marché potentiel⁴⁷ font penser que la question de ce mémoire va être plus que d'actualité et que le développement d'une application permettant la transformation de modes d'emploi papier en réalité augmentée pourrait rencontrer les besoins du marché.

Les gains en termes de temps et d'erreur seront un avantage pour les consommateurs (d'autant plus si l'opérateur a un niveau faible de compétence).

Pour pérenniser cette application, le choix d'une plateforme est délicat, quand on voit le nombre d'abandons ("Tango") et de rachats ("Metaio"). Mais une constante de stabilité semble désigner trois candidats pour le développement : soit "Vuforia" soit "ARtoolkitX" ou encore "Wikitude". Le choix sera fait suivant les compétences de l'équipe. Mais le développement ex nihilo sera évité. On peut s'étonner du choix d'un progiciel commercial, mais mon expérience au sein d'une grosse société m'a fait prendre conscience que les coûts de licence sont nettement inférieurs au coût de main-d'œuvre qu'ils font épargner. Cela mériterait une étude complète telle qu'enseignée par M. Petit dans son cours de E-Business en vue d'en évaluer la faisabilité et la rentabilité financière.

Ce SLR pourrait amener les industriels à reconsidérer leur approche de la réalité augmentée en vue de réduire les charges de documentation, de maintenance, voire même apporter de nouvelles fonctionnalités à leur produit tout en réduisant les coûts de production, et amener dans leur société les bases de la révolution industrielle 4.0. Car s'ils adoptent un des marqueurs de type "Vumarks" ou adoptent les techniques d'objets connectés, l'application pourra facilement déterminer l'objet à maintenir, et trouver les procédures de maintenance qui lui sont associées. De plus une réduction

⁴⁷ J. Porter pronostique 60 milliards de dollars pour 2020, tandis que pour 2019 on estime les dépenses à 20 milliards de dollars, contre 12 milliards en 2018 (chiffre cité par F Carrière [48]).

des documents papier et des déplacements des techniciens ne peut faire que rendre plus écologique l'image des dits industriels.

Cette recherche ne peut être exhaustive. Il pourrait sans aucun doute être complété et d'autres aspects pourraient être approfondis comme par exemple l'analyse algorithmique et mathématique des problèmes de Mapping et Tracking ou encore le "Deep Learning 6D" utilisé pour trouver la position des objets.

Il serait utile d'analyser de manière détaillée les deux kits de développements de "Google" et "Apple" et comprendre leurs possibilités respectives pour développer une application.

Quant aux plateformes de développement, même si dans le cadre de ce mémoire, "Vuforia" semble répondre le mieux à notre objectif, il serait intéressant de faire une étude approfondie des caractéristiques des autres challengers ("Wikitude", "ARtoolkitX"...))

Les marqueurs, avec l'évolution qu'ont amenée les "Vumarks", proposent une piste de recherche dans leur création. Ceux-ci pourraient être à 2 dimensions, une grande pour la position et l'identification de l'appareil dans un environnement large (pour voir son état ou pour afficher son panneau de commande) l'autre plus petite avec plus de détails et de précisions (pour permettre par exemple la maintenance).

Dans l'étape d'Authoring de notre application, on convertit souvent le mode d'emploi au format PDF en élément de réalité augmentée, cette étape mériterait une recherche complète pour une transformation plus automatique et plus adaptée.

Mais face à ce nouvel espace sensoriel, il nous reste à apprendre, comprendre et utiliser les informations et les services qu'il va nous fournir, car peu de gens savent ce qu'est la réalité augmentée, et le potentiel qu'elle pourra nous apporter. Il sera intéressant de faire une maquette de l'interface utilisateur pour la confronter à des utilisateurs d'âge et de cultures informatiques différents pour évaluer son acceptation.

C'est donc aux développeurs de lui apporter le plus d'affordance possible, car c'est l'expérience utilisateur qui sera le défi majeur pour la réussite de cette entreprise. Seul un outil intuitif pourra avoir du succès.

14. Glossaire

De nombreux termes présents dans les articles sont des acronymes, certains étant des synonymes. Certains problèmes de traduction peuvent

apparaître, comme par exemple le terme « chamfer » qui en traduction littérale donne *chanfrein*, mais qui dans le cadre de la réalité augmentée semble plus correspondre à *contour*.

6D : position d'un objet identifié dans l'environnement AR (3D) et un vecteur d'orientation et d'échelle (3D).

AR : Augmented Reality ou RA Egalité Augmentée.

ARMS : Augmented Reality assisted maintenance System ou SRAM
Système de Réalité Augmentée assistée pour la Maintenance

CAO : Conception assistée par ordinateur (CAD Computer Aided Design)

Deep learning : Utilisation de réseau de neurones artificiels pour apprendre

DIY : Do-It-Yourself

FOV : Field Of View, la partie visible sur un écran

GPS : Global Positioning System, système de géolocalisation par satellite

GSLAM : General Simultaneous Localization and Mapping, utilisation dans SLAM des senseurs (IMU,...) et des caméras RGB-D

GUI : Graphical User interface, interaction avec les données par les objets graphiques

HBR : La Harvard Business Review est une revue américaine sur le monde de l'entreprise, éditée mensuellement depuis 1922 par Harvard Business Publishing, maison d'édition appartenant à la Harvard Business School, école de management de l'université (Wikipedia).

HHD : Hand-Held Devices (smartphone) ou HAR Handled Augmented Reality

HMD : Head Mounted Display, Hololens et autres casques qui diffusent des applications AR

HUD : Head-up display affichage tête haute (voiture avion, etc.)

HWD : Head Worn display, similaire à HMD

IETEM : Interactive Electronique Technical Manuals

IHM : Interface Home Machine, décrit et adapte tout ce qui concerne l'UX

IMU : Inertial Measurement Unit, l'accéléromètre d'un smartphone, une fine tige de silicium chargée et mobile, mais qui a quand même une inertie,

qui se déplace dans une cage dont on mesure le champ pour déterminer l'accélération (il en faut 3, pour chaque axe xyz)

IRVEs : Information Rich Virtual Environment

ORB-SLAM: C'est une solution SLAM monoculaire (une seule caméra) polyvalente capable de calculer en temps réel la trajectoire de la caméra et une reconstruction 3D clairesemée de la scène dans une grande variété d'environnements.

PTAM : Parallel Tracking and Mapping.

RA : Réalité augmentée ou AR Augmented Reality

RGB-D : C'est une caméra qui fournit simultanément une image couleur (Read-Green-Blue) et une carte de profondeur (Depth) caractérisant la distance des objets vus par rapport au plan focal.

SLAM: Simultaneous Localization and Mapping

SLR: Systematic Literature Review ou Revue Systématique Littéraire (RSL)

UX : L'expérience utilisateur, aussi connue sous les acronymes EU ou plus couramment UX (User eXperience), est une notion de plus en plus courante là où l'on utilisait, encore récemment, les notions d'ergonomie des logiciels et d'utilisabilité (Wikipédia).

VATS : (Visual assembly tree structure) arbre de tâche à effectuer

VirIP : (Virtual interaction panel) panneau interactif virtuel

VISLAM: Visual-Inertial Simultaneous Localization and Mapping, intégration des senseurs inertiels dans le Tracking

VRD : Virtual Retinal Display (exemple <https://www.lightvision.fr/fr>)

VUI : Vocal User interface, interface utilisateur vocale c'est à dire une interaction vocale ou auditive

WAAD : Work Activity Affinity Diagram , tris par carte

XML: Extensible Markup Language, langage de balisage extensible qui est un métalangage permettant l'échange de données complexes

15. Bibliographie

Tous les documents repris dans cette bibliographie peuvent être consultés à partir de



<https://1drv.ms/u/s!AlolALN8AbzEgZRULI0YvdwWo3xSXw?e=RdcBML>

- [1] M. Heppelmann, James Porter, “Pourquoi Les Entreprises Ont Besoin D’Une Stratégie De Réalité Augmentée,” *Harvard Business Rev.*, vol. November-D, 2017.
- [2] Rédaction, “IKEA Place augmented reality app.” [Online]. Available: <http://highlights.ikea.com/2017/ikea-place/>. [Accessed: 20-Jul-2019].
- [3] Will, “LEGO Hidden Side : premiers visuels officiels des sets prévus - Hoth Bricks,” 2019. [Online]. Available: <https://www.hothbricks.com/lgeo-hidden-side-premiers-visuels-officiels-des-sets-prevus/>. [Accessed: 25-Jun-2019].
- [4] R. By, A. Booth, and D. Papaioannou, *Systematic Approaches to a Successful Literature*. 2016.
- [5] C. Gronier, Guillaume Lallemand, *Méthode de design UX*, Eyrolles. 217AD.
- [6] J. Holopainen, O. Mattila, P. Parvinen, E. Pöyry, and K. Seppälä, “Employing Mixed Reality Applications: Customer Experience Perspective,” *Proc. 51st Hawaii Int. Conf. Syst. Sci.*, vol. 9, 2018.
- [7] R. Sebastian, R. Olivadese, E. Piaia, R. Di Giulio, and P. Bonsma, “Connecting the Knowhow of Design , Production and Construction Professionals through Mixed Reality to Overcome Building ’ s Performance Gaps,” pp. 2–6, 2018.
- [8] R. Palmarini, J. A. Erkoyuncu, R. Roy, and H. Torabmostaedi, “A systematic review of augmented reality applications in maintenance,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 49, no. June 2017, pp. 215–228, 2018.
- [9] S. Patra, K. Gupta, F. Ahmad, C. Arora, and S. Banerjee, “EGO-SLAM : A Robust Monocular SLAM for Egocentric Videos,” *2019 IEEE Winter Conf. Appl. Comput. Vis.*, pp. 31–40, 2019.
- [10] V. Havard, D. Baudry, A. Louis, and B. Mazari, “Augmented Reality maintenance demonstrator and associated modelling,” no. d, pp. 329–330, 2015.
- [11] B. Al Delail, L. Weruaga, and M. J. Zemerly, “Indoor localization and navigation using smartphones augmented reality and inertial tracking,” no. December, 2013.

- [12] N. S. Lakshmpurba, S. Kasderidis, P. Mousoulitis, L. Petrou, and O. Beltramello, "Augmented reality for maintenance application on a mobile platform," *2015 IEEE Virtual Real. Conf. VR 2015 - Proc.*, pp. 355–356, 2015.
- [13] Rédaction, "Comment fonctionne un accéléromètre de smartphone ? - Couleur-Science," 2017. [Online]. Available: <https://couleur-science.eu/?d=669308--comment-fonctionne-un-accelerometre-de-smartphone>. [Accessed: 23-Jul-2019].
- [14] F. Lamberti, F. Manuri, A. Sanna, G. Paravati, P. Pezzolla, and P. Montuschi, "Challenges, opportunities, and future trends of emerging techniques for augmented reality-based maintenance," *IEEE Trans. Emerg. Top. Comput.*, vol. 2, no. 4, pp. 411–421, 2014.
- [15] J. Zubizarreta and I. Aguinaga, "A framework for augmented reality guidance in industry," 2019.
- [16] S. Garrido-Jurado, R. Muñoz-Salinas, F. J. Madrid-Cuevas, and M. J. Marín-Jiménez, "Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion," *Pattern Recognit.*, vol. 47, no. 6, pp. 2280–2292, 2014.
- [17] J. Angulo, M. De Paris, and F. France, "Sur l' influence des conditions d' éclairage dans la segmentation morphologique couleur par LPE 1 Introduction 2 Préliminaires," *Image (Rochester, N.Y.)*, no. January, pp. 1–6, 2005.
- [18] J. Martín-gutiérrez, I. Inés, and S. Pérez, "Augmented Reality Approach to Domestic Maintenance Tasks," pp. 125–129, 2011.
- [19] M. L. Yuan, S. K. Ong, and A. Y. C. Nee, "Augmented reality for assembly guidance using a virtual interactive tool," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 46, no. 7, pp. 1745–1767, 2008.
- [20] S. J. Henderson and S. Feiner, "Evaluating the benefits of augmented reality for task localization in maintenance of an armored personnel carrier turret," *Sci. Technol. Proc. - IEEE 2009 Int. Symp. Mix. Augment. Reality, ISMAR 2009*, pp. 135–144, 2009.
- [21] K. Cassim, "Hololens 2 : Microsoft revient au MWC pour une annonce spéciale - FrAndroid," 2019. [Online]. Available: https://www.frandroid.com/marques/microsoft/563887_hololens-2-microsoft-revient-au-mwc-pour-une-annonce-speciale. [Accessed: 23-Jul-2019].
- [22] H. Jo, S. Hwang, H. Park, and J. H. Ryu, "Aroundplot: Focus+context interface for off-screen objects in 3D environments," *Comput. Graph.*, vol.

35, no. 4, pp. 841–853, 2011.

- [23] A. Cockburn, A. Karlson, and B. B. Bederson, “A review of overview+detail, zooming, and focus+context interfaces,” *ACM Comput. Surv.*, vol. 41, no. 1, pp. 1–31, 2008.
- [24] M. Sarkar, S. S. Snibbe, O. J. Tversky, and S. P. Reiss, “Stretching the Rubber Sheet: A Metaphor for Viewing Large Layouts on Small Screens,” *Proc. 6th Annu. ACM Symp. User Interface Softw. Technol. (UIST '93)*, no. September, pp. 81–91, 1993.
- [25] S. Henderson and S. Feiner, “Exploring the Benefits of Augmented Reality Documentation for Maintenance and Repair,” vol. 17, no. 10, pp. 1355–1368, 2011.
- [26] I. Fernández Del Amo, J. A. Erkoyuncu, R. Roy, and S. Wilding, “Augmented Reality in Maintenance: An information-centred design framework,” in *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 19, no. 2017, pp. 148–155.
- [27] A. Sanna, F. Manuri, F. Lamberti, S. Member, G. Paravati, and P. Pezzolla, “Using Handheld Devices to Support Augmented Reality-based Maintenance and Assembly Tasks,” pp. 178–179, 2015.
- [28] G. Paravati, “Augmented Reality for Maintenance,” in *Encyclopedia of Computer Graphics and Games*, 2017, pp. 1–7.
- [29] rédaction, “LightVision : des lunettes à réalité augmentée par projection d’images sur la rétine — Silver Economie,” 2013. [Online]. Available: <https://www.silvereco.fr/lightvision-des-lunettes-a-realite-augmentee-par-projection-dimages-sur-la-retine/315202>. [Accessed: 23-Jun-2019].
- [30] Rédaction, “Actualités | Light Vision,” 2017. [Online]. Available: <https://www.lightvision.fr/fr/Actualites>. [Accessed: 22-Jul-2019].
- [31] M. Chartier, “[MàJ] Intel abandonne Vaunt, ses lunettes à projection rétinienne - Les Numériques,” 2018. [Online]. Available: <https://www.lesnumeriques.com/casque-realite-augmentee/intel-vaunt-lunettes-a-projection-retinienne-normales-n71243.html>. [Accessed: 23-Jun-2019].
- [32] Rédaction, “Software only Face and Eye Tracking on mobile devices - Umoove.” [Online]. Available: <http://www.umoove.me/technology.html>. [Accessed: 29-Jul-2019].
- [33] P. Siagian and S. Hutauruk, “Voice controller mobile android application,” 2018.
- [34] Rédaction, “SiriKit | Apple Developer Documentation.” [Online]. Available:

- <https://developer.apple.com/documentation/sirikit>. [Accessed: 29-Jul-2019].
- [35] Rédaction, "Get Started with System Voice Actions | Voice Actions | Google Developers." [Online]. Available: <https://developers.google.com/voice-actions/system/>. [Accessed: 29-Jul-2019].
 - [36] Bushra Mahmood, "A Quick Guide to Designing for Augmented Reality on Mobile (Part 1)," 2018. .
 - [37] C. Y. Siew, S. K. Ong, and A. Y. C. Nee, "A practical augmented reality-assisted maintenance system framework for adaptive user support," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 59, no. March, pp. 115–129, 2019.
 - [38] H. Alvarez, "Providing Guidance for Maintenance Operations Using Automatic Markerless Augmented Reality System," p. 2013, 2013.
 - [39] G. Klein and D. Murray, "Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces," 2007.
 - [40] H. Martínez, S. Laukkanen, and J. Mattila, "A new hybrid approach for augmented reality maintenance in scientific facilities," *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 10, pp. 1–10, 2013.
 - [41] Rédaction, "VuMark from vuforia." [Online]. Available: <https://library.vuforia.com/articles/Training/VuMark>. [Accessed: 25-Jun-2019].
 - [42] Rédaction, "Vuforia Fusion." [Online]. Available: <https://library.vuforia.com/articles/Training/vuforia-fusion-article.html>. [Accessed: 16-Jul-2019].
 - [43] M. Quan, S. Piao, M. Tan, and S. S. Huang, "Accurate Monocular Visual-Inertial SLAM Using a Map-Assisted EKF Approach," *IEEE Access*, vol. 7, no. April, pp. 34289–34300, 2019.
 - [44] Y. Li, G. Wang, X. Ji, Y. Xiang, D. Fox, and C. V Mar, "DeepIM : Deep Iterative Matching for 6D Pose Estimation."
 - [45] Redaction, "Oculus Rift S." [Online]. Available: https://www.oculus.com/rift-s/?locale=fr_FR. [Accessed: 07-Jul-2019].
 - [46] R. Geometry and G. Analysis, "AR-media." .
 - [47] Despoinis Vatomouro, "AR frameworks | Tableaux comparatifs - SocialCompare," 2018. [Online]. Available: <http://socialcompare.com/fr/comparison/ar-frameworks-388frkga>. [Accessed: 06-Jul-2019].

- [48] F. Carrière and J. Graujean, "IMMERGEZ LES UTILISATEURS DANS VOTRE RÉALITÉ !," *Wavestone*, 2019.
- [49] J. E. H. Michael E. Porter, "Les Entreprises Ont Besoin d ' une stratégie de réalité augmentée," *Harvard Buisness Review*, 2019.
- [50] Usabilis, "Qu'est-ce que l'affordance ? Définition affordance Web, UX Design, Gibson." [Online]. Available: <https://www.usabilis.com/definition-affordance/>. [Accessed: 23-Jul-2019].

16. Table des Illustrations

Figure 1 Tirée de « A taxonomy of mixed reality visual displays » [42].....	6
Figure 2 Ikea Place [2]	7
Figure 3 Lego Nexa Knight [3].....	7
Figure 4 Visualisation des veines 1	7
Figure 5 Exemple d'une machine à café et sa procédure de détartrage.	11
Figure 6 Post IT d'évaluation.....	14
Figure 7 Application AR avec écart cognitif restant important [8]	19
Figure 8 Répartition des Interactions RA/utilisateur[8]	20
Figure 9 Tracking	21
Figure 10 Schema d'un Accéléromètre [13]	23
Figure 11 Algorithme AR et IMU.....	24
Figure 12 Réparation d'un PC en réalité augmentée (Easer-R3)	24
Figure 13 Écran AR pour la réparation de PC (EASER-R3).....	24
Figure 14 6D pose.....	26
Figure 15 Pipeline AR	27
Figure 16 Caméra sphérique.....	27
Figure 17 Taux de réussite de reconnaissance d'objets occultés ("Argitur")	28
Figure 18 Exemples de marqueurs	29
Figure 19 Exemples de marqueurs générés	30
Figure 20 Exemple de réalité augmentée (a) Scène initiale comportant les marqueurs (b) les marqueurs sont détectés et utilisés pour trouver la position de la caméra (c) réalité augmentée avec un problème d'occlusion (d) et enfin sans problèmes d'occlusion	31
Figure 21 Segmentation chromatique [17]	31
Figure 22 Réparation RA d'un vélo	33
Figure 23 L'arbre de construction d'un PC (Vats).....	34
Figure 24 HMD : Microsoft Hololens [21].....	35
Figure 25 Vue globale sans modification.....	36
Figure 26 'fish eyes' sphérique	36
Figure 27 'fish eyes' orthogonale.....	36
Figure 28 Coordonnées 3D vers Fish-eyes orthogonal	37
Figure 29 Diagramme d'état de l'agrandissement dynamique d'"Aroundplot" ..	37
Figure 30 RA pour une tourelle de char	38
Figure 31 Exemple d'application de maintenance d'un portable[27]	40
Figure 32 RA pour le changement d'un toner d'imprimante	41
Figure 33 Écrans de RA pour le nettoyage de lentille dans un outil de mesure basé sur le laser.....	41
Figure 34 Diagramme de séquence d'utilisation de la reconnaissance vocale	43
Figure 35 Exemple de Snaping	44

Figure 36 Différents plans arrière pour une application RA.....	45
Figure 37 En-têtes de dégradé sur Instagram, couleur de marque IKEA comme couleur d'accent, couleur d'alerte rouge Pokemon GO.....	45
Figure 38 Couleur RA des menus	46
Figure 39 iOS portrait mode, Instagram location sticker, Pokémon Go stats ...	46
Figure 40 Icônes snapchat	47
Figure 41 Transparence élément RA	47
Figure 42 Graphique de déplacement AR.....	48
Figure 43 Algorithme AR.....	51
Figure 44 Tenda MW6 wifi mesh.....	53
Figure 45 AgroTIC (2013, 5 décembre) schéma d'une application de réalité augmentée	55
Figure 46 Marqueur et OCR.....	56
Figure 47 Vumarks [41]	57
Figure 48 : Modèle de fusion de Vuforia [42].....	58
Figure 49 Veer pour smartphone.....	65
Figure 50 Mock-up de l'application machine à café, aide vocale : "Allumez la machine"	68
Figure 51 Mock-up de l'application machine à café, aide vocale : "Remplir le bac avec la solution préparée".....	68
Figure 52 Mock-up de l'application machine à café, aide vocale : "Tournez la manette vapeur vers l"	68

17. Annexes

17.1. Disponibilité ARCore

https://developers.google.com/ar/discover/supported-devices#android_play

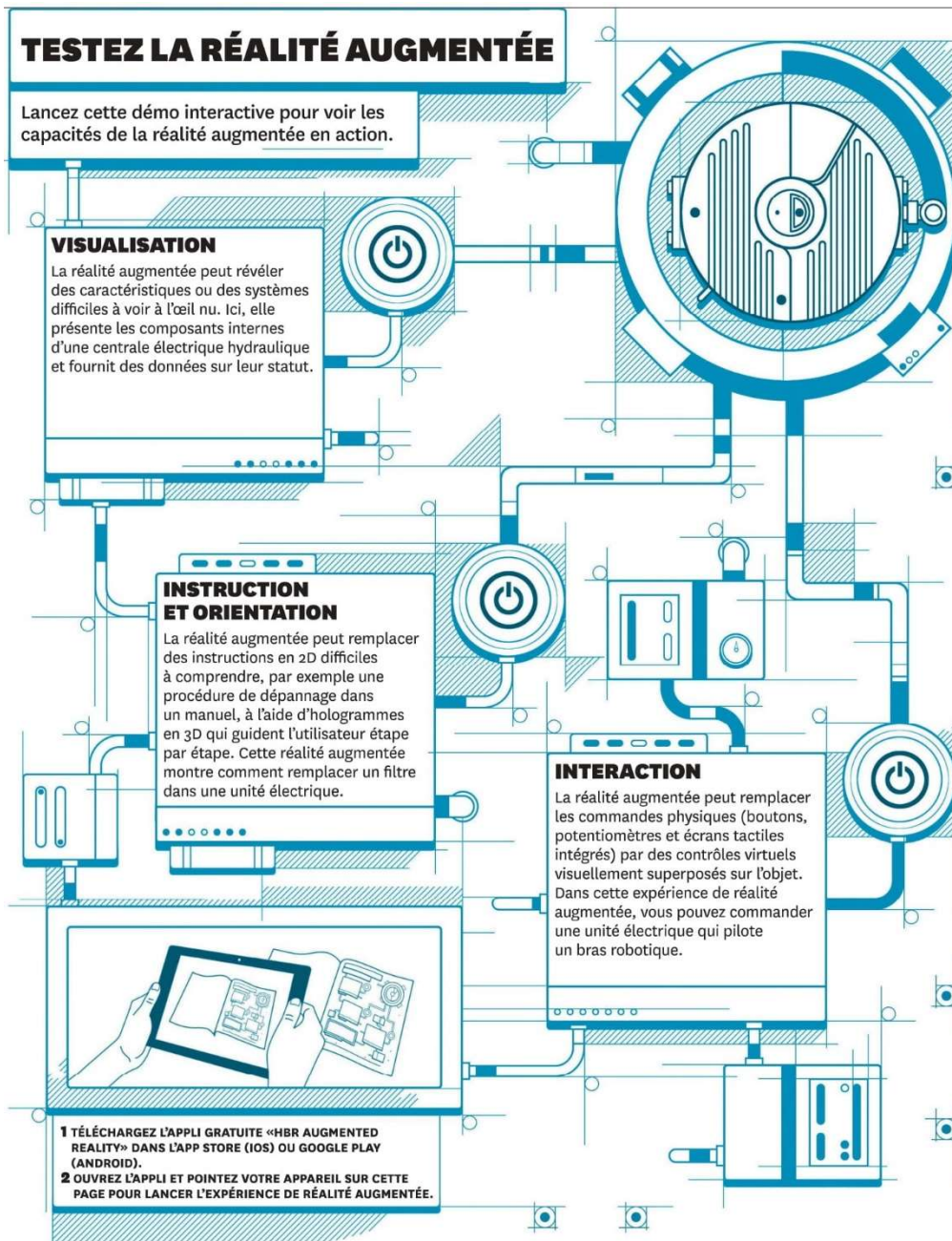
Avec per exemple les smartphone Samsung :

- Galaxy A3 (2017) Requires Android 8.0 or later.
- Galaxy A5 (2017)
- Galaxy A6 (2018)
- Galaxy A7 (2017)
- Galaxy A8, Galaxy A8+ (2018)
- Galaxy A30, Galaxy A40, Galaxy A50, Galaxy A60, Galaxy A70, Galaxy A80
- Galaxy J5 (2017), Galaxy J5 Pro SM-J530 models
- Galaxy J7 (2017), Galaxy J7 Pro SM-J730 models
- Galaxy Note8
- Galaxy Note9
- Galaxy S7, Galaxy S7 edge
- Galaxy S8, Galaxy S8+
- Galaxy S9, Galaxy S9+
- Galaxy S10e, Galaxy S10, Galaxy S10+, Galaxy S10 5G
- Galaxy Tab S3, Galaxy Tab S4, Galaxy Tab S5e

Par exemple mon gsm Samsung A7 2018 n'est pas supporté

17.2. Exemple d'application de réalité augmentée

Réalisée par Bullyentertainment ⁴⁸ pour le Harvard Business Review [49] voir l'application HBR sur google play ou App Store. Cette application a été développée avec Vuforia.



48



<http://bullyentertainment.com/>